

Abril 2012 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

MEDIOAMBIENTE
Efectos climáticos del polvo

EPIDEMIAS
Mutaciones en el virus de la gripe

BIOCOMBUSTIBLES
Potencial y limitaciones de las algas

UNIVERSO DIGITAL

¿Determina el principio holográfico la estructura del espaciotiempo?

UNIVERSO DIGITAL | BIOCOMBUSTIBLES DE MICROALGAS | EL VIRUS DE LA GRIPE

N.º 427

ABRIL 2012





6,00 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Abril 2012, Número 427

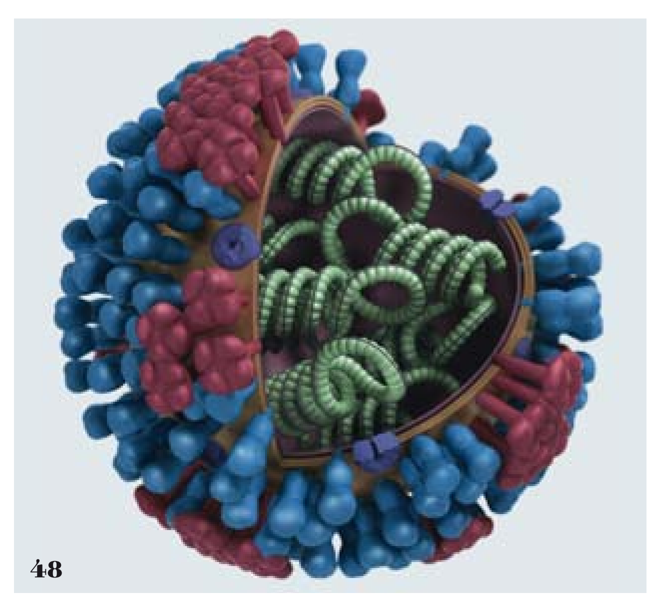


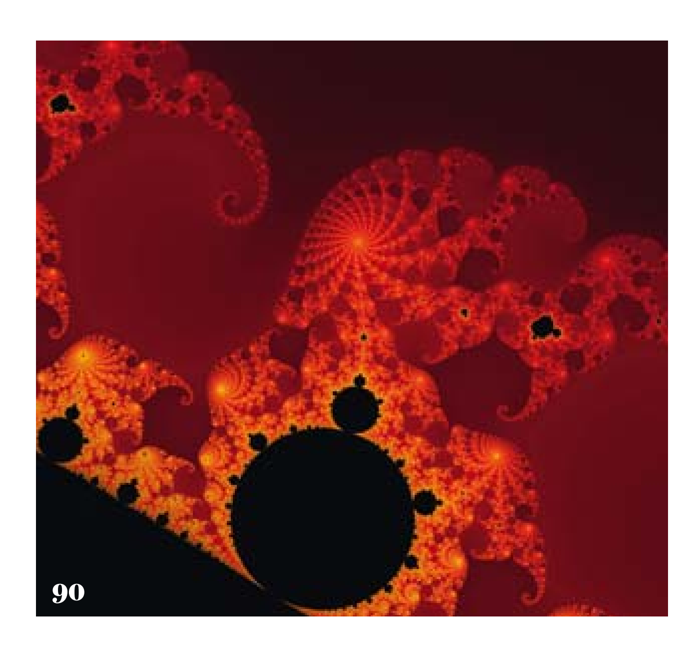
72

ADAM VOORHES

ARTÍCULOS


6


48

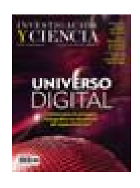

90

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Uno de los paradigmas más aceptados en la investigación moderna sobre gravedad cuántica es el principio holográfico, el cual establece, a partir de consideraciones muy generales, una profunda conexión entre los conceptos de espaciotiempo e información. Un grupo de expertos cree que algunas de sus consecuencias podrían ser detectables con interferómetros láser muy precisos. Imagen de Vault49.



redaccion@investigacionyciencia.es



Marzo 2012

CONOCIMIENTO Y EXPERIENCIA

En referencia a los desafíos de la neurociencia expresados por Juan Lerma en «El gran reto» [Investigación y Ciencia, marzo de 2012], quisiera resaltar un importante sesgo que el ámbito investigador aún no ha valorado adecuadamente. Cuando tratamos de desvelar el funcionamiento del cerebro humano, nos enfrentamos a un hecho ineludible: cada objeto de estudio es único y diferente. Son las experiencias las que, partiendo de cimientos genéticos, conforman su propia estructura y funcionamiento de una forma dinámica, dando lugar a un inmenso conjunto de comportamientos a lo largo del tiempo.

La neurociencia emplea dos grandes enfoques: el empírico, que se basa en las experiencias ajenas (pacientes o cobayas), y el teórico, que utiliza los avances en varias disciplinas para abordar, desde distintos niveles, la complejidad del sistema nervioso. Sin embargo, dadas las limitaciones técnicas aún existentes, ninguno de estos enfoques resulta suficiente. Se requiere un tercero, tan importante como los anteriores: el experiencial, basado en la experiencia real de las situaciones que se pretenden explorar. Ello se debe a que existen numerosos fenómenos psicológicos y fisiológicos que no se desencadenan si el individuo no se ve expuesto a la situación real.

Ese planteamiento adolece de una dificultad intrínseca importante: para poder aprovecharlo al máximo, debería ser el propio investigador quien se viera expuesto al fenómeno que pretende estudiar. Han sido muy pocos los casos en los que todos estos enfoques han concurrido (Viktor Frankl o Jill Bolte). No muchos investigadores querrán someterse a sesiones de tortura psicológica sostenida o inducción artificial de aneurismas.

Dicha limitación podría salvarse incorporando la experiencia real. No solo como sujeto pasivo de estudio, sino como parte permanente del proceso investigador, combinando el saber de los neurocientíficos con el conocimiento subjetivo de las personas que, forzosamente, han debido pasar por esas experiencias y pueden desgranarlas.

Mario Garcés Romeu

Responde Lerma: *La neurociencia abarca una variedad de disciplinas que emergen en una sola con el objetivo de entender el cerebro. Los enfoques experimentales, necesariamente reduccionistas, la han provisto de bases y datos que nos permiten entender, en parte, el funcionamiento neuronal. Sabemos menos del nivel circuital y, desde luego, carecemos de un modelo sobre el funcionamiento del cerebro. Entre el conocimiento mecanicista y el psicológico o psiquiátrico, por ejemplo, media una distancia considerable que, poco a poco, está desapareciendo. Ello se debe al carácter unificador de la neurociencia. En su época, Cajal y Freud se ignoraban mutuamente. En la actualidad eso no sucedería.*

Coincido en que cada cerebro posee componentes únicos dictados por la experiencia de cada uno de ellos. No puedo estar de acuerdo, sin embargo, en que existan fenómenos psicológicos y fisiológicos únicos que no se desencadenen si el individuo no se ve expuesto a una situación dada. La ciencia busca explicaciones objetivables y principios generales. Que el investigador no pueda entender el fenómeno o explicarlo si previamente no lo ha experimentado sería como afirmar que Newton tendría que haber saltado desde la rama del árbol para describir la ley de la gravedad, o que no podemos conocer la fisiología o el funcionamiento cardíacos sin haber sufrido un infarto.

Naturalmente que la experiencia ajena sirve —y mucho—. Este acercamiento se encuentra presente en la neurociencia actual. Pero es un hecho que todos los humanos guardamos grandes semejanzas entre nosotros, al igual que los ratones se parecen a otros ratones, y los gatos, a otros gatos, en todos los sentidos. Cuando descubramos qué nos confiere nuestras señas de identidad, tal vez nos hallemos en condiciones de dilucidar las diferencias que median entre nosotros. Estos son los retos a los que se enfrenta la neurociencia, y solo podremos abordarlos desde la conjunción de una variedad de conocimientos.

LA GLORIA DE ULLOA

En relación con el artículo «Física de la gloria» [por H. M. Nussenzveig, Investigación y Ciencia, marzo de 2012], desearía puntualizar que, en meteorología, el fenómeno ha sido denominado durante muchos años «anillos de Ulloa», en memoria del científico español Antonio de Ulloa (1716-1795). Descubridor del platino como elemento químico, Ulloa formó parte de la expedición geodésica hispano-francesa al reino de Quito, durante la cual redactó un informe, con gráfico incluido, sobre el fenómeno que lleva su nombre. El artículo no menciona tal denominación, por lo que el lector podría pensar que estas se refieren a fenómenos diferentes.

Asimismo, conviene aclarar que no hace falta ser alpinista para observarlo; puede verse también desde montañas de poca altura. Yo mismo pude experimentarlo un día en el monte Castromao (Orense), de tan solo 732 metros de altitud. Se trata de algo asombroso e inolvidable.

Mariano García Rollán
Madrid

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

MEDIOAMBIENTE

Perfeccionar la fotosíntesis

Durante años, los investigadores han intentado descubrir las mejores formas de conseguir que las plantas produzcan biocombustibles. Sin embargo, existe un gran problema: la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas convierten la luz solar en energía química almacenada, es muy poco eficiente. Las plantas solo transforman entre un uno y un tres por ciento de la luz solar en hidratos de carbono. Esta es una de las razones por las que es necesario destinar tanto terreno al cultivo de maíz para obtener etanol, por citar una de las ideas poco afortunadas para conseguir biocombustibles. Aun así, las plantas ofrecen muchas ventajas: absorben el dióxido de carbono a bajas concentraciones directamente de la atmósfera y cada célula vegetal puede repararse a sí misma cuando sufre daños.

Se han emprendido nuevos esfuerzos para mejorar la fotosíntesis y ayudar a la humanidad a conseguir combustibles más ecológicos. Hasta el momento, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada sobre la Energía (ARPA-e) ha financiado diez de tales proyectos. La mayoría recurren a la ingeniería genética para modificar ligeramente el manual de instrucciones del ADN de la planta a fin de fomentar el crecimiento, sintetizar pigmentos u obtener otros beneficios. La mayor subvención, de más de seis millones de dólares, se concedió a la Universidad de Florida por un proyecto para alterar pinos con el propósito de que fabriquen más trementina, un posible combustible. Otro proyecto, dirigido por Arcadia Biosciences, una empresa con base en Davis, California, pretende conseguir que algunas gramíneas de rápido crecimiento, como el pasto varilla, produzcan aceite vegetal por primera vez en la historia.

En el futuro, los científicos podrían crear una planta de color negro que absorbería toda la luz incidente o una planta que utilizaría distintas longitudes de onda de luz para las diversas etapas de la fotosíntesis, ya que actualmente las plantas emplean las mismas longitudes de onda para todo. Una planta desarrollada mediante ingeniería genética para producir biocombustibles podría incluso tener hojas de menor tamaño, reduciendo así la energía consumida para su propio crecimiento, o podría dejar de almacenar energía en forma de azúcar, transformándola en lugar de ello en una molécula de hidrocarburo que pudiera ser utilizada como combustible.

El programa de investigación para el desarrollo mediante bioingeniería de plantas que sustituyan el petróleo (PETRO, por sus siglas en inglés) también tendrá que enfrentarse a los problemas que suponen la cada vez mayor escasez de agua de riego y el escepticismo de la opinión pública con respecto a los vegetales genéticamente modificados. También deberá afrontar la competencia que suponen los esfuerzos por reemplazar totalmente la fotosíntesis, como el programa de electrocombustibles de la propia ARPA-e, que intenta conseguir que algunos microorganismos produzcan hidrocarburos, o las iniciativas destinadas a la fabricación de hojas artificiales que utilicen la electricidad de células solares para dividir las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno para su uso como combustible. Parece que, para las plantas, ya no basta con ser verdes. *—David Biello*

TÉCNICA

Un espectrómetro para detectar terremotos... y la intolerancia a la lactosa

En los años veinte del siglo pasado, Chandrasekhara V. Raman descubrió que parte de la luz que atraviesa un medio excita sus moléculas y, después, es dispersada con una longitud de onda distinta de aquella con la que incidió, un cambio que constituye la «huella dactilar» del material. Aunque hoy los espectrómetros Raman se emplean con todo tipo de fines, suelen ser caros y voluminosos. Ahora, un equipo dirigido por Manfred Fink, de la Universidad de Texas en Austin, está desarrollando un modelo más barato y de menor tamaño, el cual podría desde mejorar la detección de terremotos hasta reducir el coste de algunas pruebas médicas.

Con el tamaño de una maleta, el dispositivo de Fink no mide todo el espectro luminoso, sino únicamente la región que incluye el patrón de una molécula diana. El aparato, bautizado como espectrómetro Raman analítico no dispersivo, contiene un pequeño diodo láser cuya luz rebota entre dos espejos cóncavos, lo que aumenta su potencia. Esta amplificación incrementa también la sensibilidad del dispositivo, que puede detectar impurezas con una precisión de una parte entre mil millones.

Una posible aplicación consistiría en emplear el ingenio junto con sismógrafos; algo que podría servir para predecir terremotos incluso con 45 minutos de antelación. Por lo general, los sismógrafos encuentran dificultades para distinguir los temblores sísmicos de aquellos con un origen distinto, como los que provocan las labores de construcción. Un espectrómetro, en cambio, detectaría fluctuaciones anómalas en los gases que, en los momentos de actividad sísmica, desprenden los manantiales termales y las fisuras oceánicas.

Otros expertos buscan aplicaciones médicas. Shirish Barve, gastroenterólogo de la Universidad de Louisville, investiga la posibilidad de detectar y estudiar enfermedades hepáticas mediante el análisis del aliento de los pacientes. Fink, por su parte, cree que el aparato podría emplearse para detectar en los recién nacidos la intolerancia a la lactosa.

—Melissa Gaskill

CHRIS STEIN, GETTY IMAGES (*hoja*)

OBESIDAD

Saciar el apetito

Adelgazar no solo representa un objetivo para quien quiere lucir tipo en la playa o desea ponerse unos pantalones ajustados. Para las personas obesas, perder peso significa luchar contra una grave enfermedad, recuperar la salud. Sin embargo, la parte principal del cerebro que regula el apetito no eliminará el hambre solo porque alguien haya reconocido que necesita perder peso. Un equipo de la Universidad de Syracuse está trabajando para encontrar una solución excepcional: un chicle que reduce el apetito.

En el mercado hay numerosos medicamentos que inhiben el apetito, pero estos suelen basarse en sustancias parecidas a las anfetaminas, con el consiguiente riesgo de hipertensión arterial y problemas cardíacos. Robert P. Doyle, químico de Syracuse, centra sus esfuerzos en el péptido YY humano (hPYY), una hormona liberada por las células que recubren el intestino cada vez que comemos o hacemos ejercicio. Cuantas más calorías consumimos, más hPYY se transfiere de las células intestinales a la circulación sanguínea. A través de la sangre, la hormona alcanza el hipotálamo, una parte del cerebro del tamaño de una almendra, evolutivamente muy antigua, que ayuda a regular el hambre, la sed, la temperatura corporal y los ciclos del sueño.

Algunos estudios anteriores ya habían demostrado que las inyecciones de PYY y de hPYY reducen el apetito en roedores, simios y humanos. En un estudio se observó que, dos horas después de recibir una dosis de hPYY, tanto las personas obesas como las delgadas consumían un 30 por ciento menos de calorías de lo normal en un bufé.

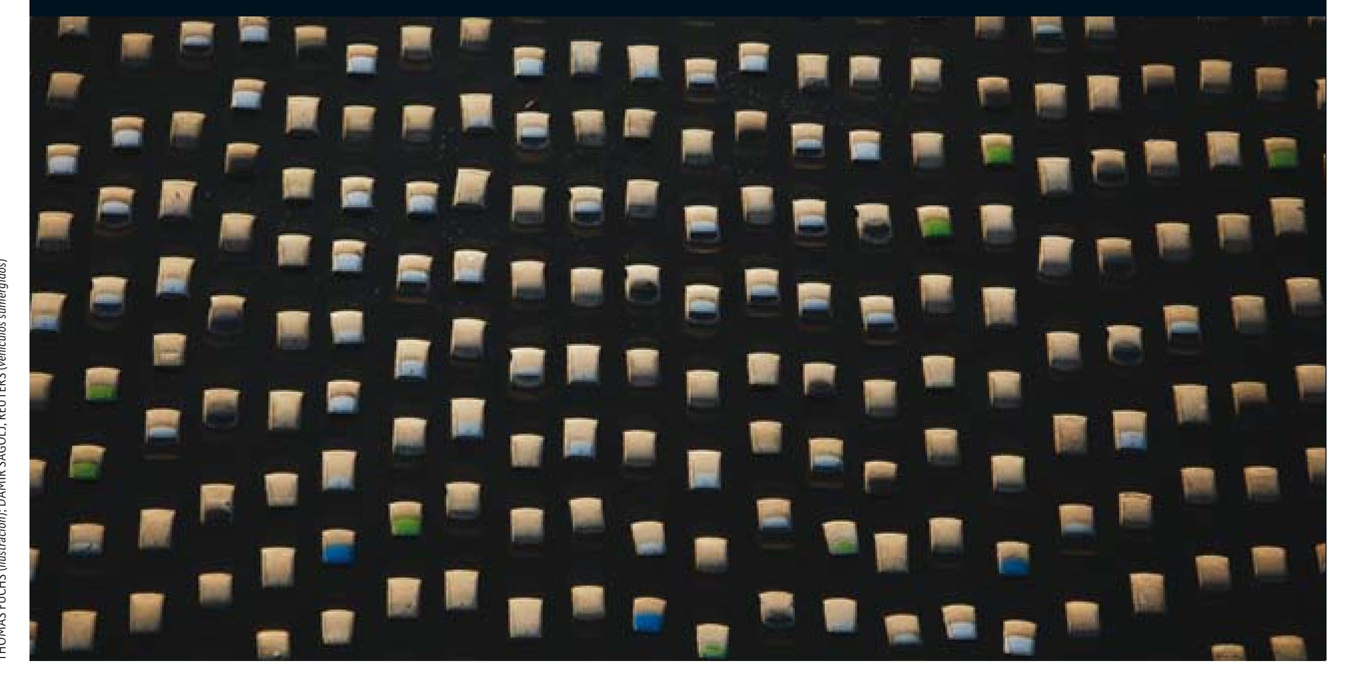
Hasta ahora, la dificultad se debía a que los péptidos, formados por cadenas cortas de aminoácidos, son compuestos lábiles que pueden ser destruidos por el estómago y los intestinos, pero resultan demasiado grandes para pasar al torrente circulatorio. Doyle encontró una forma de resolver el problema mediante la unión química del hPYY a la vitamina B12, que es transportada por el organismo desde el intestino hasta la sangre.

Puesto que ciertos estudios recientes sugieren que existen receptores de PYY en la lengua, un chicle de hPYY podría promover en poco tiempo la sensación de saciedad.

Si la sustancia consiguiera superar los ensayos clínicos, existiría el peligro de que la gente abusase de ella para mantenerse delgada. «Entiendo que el mercado de gente que quiere perder unos kilos es enorme», señala Doyle, «pero mi objetivo es ayudar a los pacientes con una necesidad médica de adelgazar». *—Ferris Jabr*

¿QUÉ ES ESTO?

Vehículos sumergidos: Algunas zonas de Tailandia quedaron irreconocibles tras las inundaciones del año pasado, las peores en el país en cinco décadas. La imagen muestra los techos de los automóviles en una fábrica de Honda, en la provincia de Ayutthaya, asomando entre las aguas. La catástrofe, provocada por una estación monzónica mucho más intensa de lo habitual, anegó un tercio de las provincias del país, expulsó de sus hogares a miles de personas y provocó cientos de víctimas mortales. Las aguas estancadas hicieron temer la proliferación de mosquitos y la consiguiente propagación de enfermedades como la malaria y el dengue. *—Ann Chin*



THOMAS FUCHS (*ilustración*); DAMIR SAGOLJ, REUTERS (*vehículos sumergidos*)

FÍSICA CUÁNTICA

Entrelazamiento macroscópico entre diamantes

El pasado mes de diciembre, la revista *Science* publicaba un artículo que refería el entrelazamiento entre los estados cuánticos de dos diamantes separados una distancia de quince centímetros. El entrelazamiento cuántico permite que dos o más objetos mantengan ciertos vínculos entre sí, con independencia de la distancia a la que se encuentren. Dos hipotéticos dados entrelazados, por ejemplo, caerían siempre con el mismo número aunque se lanzasen en lugares muy distantes. Sin embargo, estas correlaciones resultan extremadamente frágiles, motivo por el que los experimentos suelen llevarse a cabo con sistemas muy controlados, como una pareja de átomos aislados y enfriados a temperaturas cercanas al cero absoluto.

Los autores del estudio, sin embargo, demostraron que el entrelazamiento también puede lograrse a temperatura ambiente y entre objetos macroscópicos: en su caso, dos diamantes sintéticos de tres milímetros de largo. Los investigadores dividieron en dos un rayo láser, con el que después iluminaron las gemas. Cuando un fotón incidía en una de ellas y le transfería energía en forma de fonón (un cuanto de energía vibratoria), la partícula de luz era dispersada y canalizada hacia un detector. La llegada de un fotón indicaba, por tanto, que se había creado un estado vibratorio en los diamantes.

Según explica Ian Walmsley, físico de la Universidad de Oxford y uno de los autores del estudio: «Sabemos que en algún lugar de la estructura hay un fonón. Sin embargo, resulta imposible determinar, ni siquiera en teoría, a qué diamante corresponde». Según la mecánica cuántica, eso quiere decir que el fonón no se encuentra confinado en ningún diamante concreto; antes bien, ambos entran en un estado entrelazado en el que comparten un fonón.

Walmsley admite que el entrelazamiento con diamantes solo perdura durante un tiempo muy breve. Con todo, espera que las investigaciones sobre el tema comiencen a emplear materiales más comunes. «Creo que nuestro experimento proporciona una nueva perspectiva y un nuevo ejemplo de que algo comienza a progresar en esa dirección», concluye.

—John Matson

GENÉTICA

Un largo vuelo sin equipaje

Los millones de mariposas monarca (*Danaus plexippus*) que revolotean con sus frágiles alas desde Norteamérica hasta los bosques de abetos de México han desarrollado por evolución múltiples adaptaciones especiales para poder realizar este arduo viaje, con un recorrido de hasta 4000 kilómetros. Ahora, el borrador de la secuencia del genoma de la especie, publicado en el número de noviembre de 2011 en *Cell*, deja entrever la forma en que las adaptaciones genéticas ayudan a que estos bellos insectos sobrevivan tras su largo viaje.

—Katherine Harmon

Cerebro
Los relojes circadianos de las mariposas les permiten percibir el acortamiento del día, hecho que desencadena la migración, afirma Steven Reppert, neurobiólogo de la Universidad de Massachusetts y uno de los autores del estudio. El genoma reveló nuevos datos sobre el control molecular de estos mecanismos.

Antenas
Las mariposas poseen un gran número de genes de receptores olfativos, los cuales, al activarse en las antenas, podrían ayudarles a interactuar con otras mariposas monarca para encontrar su lugar de destino.

Ojos
Los genes implicados en el desarrollo de los ojos permitirían que las mariposas detectaran pequeños cambios en la posición del sol, así como patrones de luz polarizada. Estas sutiles diferencias tal vez les ayuden a no perder la orientación en su ruta hacia los lejanos bosques de abetos.

Órganos reproductores
No todas las mariposas monarca migran, pero las que lo hacen carecen de una enzima clave que da lugar a la hormona juvenil, la cual estimula los órganos reproductores. Ello hace que las mariposas no se desarrollen completamente ni muestren interés por el apareamiento, de modo que puedan centrarse en el largo viaje.

ANTROPOLOGÍA

Encontrar pareja, más fácil cerca de la madre

Los hombres que viven con su madre tal vez no tengan mucha suerte a la hora de encontrar novia. Sin embargo, entre los monos araña lanudos del norte (*Brachyteles hypoxanthus*), los machos que pasan más tiempo con su madre parecen tener ventaja cuando se trata de aparearse.

Los resultados de un estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* hacen pensar que las hembras de algunas especies habrían evolucionado para desempeñar una función clave en el éxito reproductor de sus hijos macho. Karen Strier, la autora principal del artículo y profesora de antropología en la Universidad de Wisconsin-Madison, opina que el trabajo refuerza la «hipótesis de la abuela», según la cual las mujeres evolucionaron para vivir más allá de sus años fértiles con el objeto de pasar más tiempo enseñando y protegiendo a su descendencia.

El equipo obtuvo datos genéticos de un grupo de 67 monos que vivían en una reserva protegida en el bosque atlántico brasileño: crías, madres y posibles padres. Descubrieron que 6 de los 13 machos adultos estudiados pasaban más tiempo cerca de su madre de lo que cabría esperar por azar. Estos seis monos engendraron un mayor número de crías por término medio.

Los investigadores están intentando descubrir la causa de ello. «No hemos visto que las madres intervengan y ayuden a sus hijos», señala. «Quizás, al sentarse cerca de su madre, descubren cuándo están en celo las otras hembras o, simplemente, las conocen mejor.» A Strier también le sorprendió que no hubiera endogamia entre los hijos y las hembras con las que estaban estrechamente emparentados, un proceso en el que también podrían intervenir las madres. «El apareamiento podría ser menos aleatorio de lo que pensábamos, quizá por la influencia de las madres», afirma.

Los resultados del estudio pueden contribuir a los futuros esfuerzos para la conservación de especies en grave peligro de extinción. «Lo último que deberíamos hacer es sacar a un macho de su grupo de nacimiento», señala Strier.

—Joan Raymond



CORTESÍA DE CARLA B. POSSAMAI, UNIVERSIDAD FEDERAL DEL ESPÍRITU SANTO (*monos*); MUSEO DE PREHISTORIA DE VALENCIA (*cuerna*)

AGENDA

CONFERENCIAS

19 de abril
Glaciaciones y dinámica no lineal
Programa «Ángel martín Municio»
Jesús Ildefonso Díaz Díaz, Universidad Complutense de Madrid
Casa de las Ciencias, Logroño
casadelasciencias.logro-o.org

24 de abril
La pesca, ¿una actividad condenada?
Àlex Aguilar, UB
Aula de ecología
Biblioteca Jaume Fuster, Barcelona
blog.creaf.cat/agenda/aula-decologia-2012

26 de abril
Menopausia y enfermedad hepática
Ciclo «Enfermedades asociadas al envejecimiento»
Erica Villa, Universidad de Módena y Reggio Emilia
Fundación BBVA, Bilbao
www.fbbva.es

26 de abril
Neurociencia y música
Robert Zatorre, Universidad McGill
Paul Verschure, Universidad Pompeu Fabra
Espacio Fabra i Coats, Barcelona
www.bcn.cat/neurociencia

EXPOSICIONES

Hasta el 2 de mayo
Da Vinci, el genio
Centro Arte Canal, Madrid
www.davincielgenio.es

Hasta el 20 de mayo
La mirada del ídolo
Museo de Prehistoria de Valencia
Valencia
www.museuprehistoriavalencia.es



OTROS

Del 19 al 21 de abril
II Congreso de docentes de ciencias
Universidad Complutense de Madrid
Madrid
CongresoDocentesCiencias.AwardSpace.info

Semana Santa
¡Somos astrónomos!
Nuevo programa 3D
Planetario Cosmocaixa
Barcelona
www.obrasocial.lacaixa.es

FÍSICA

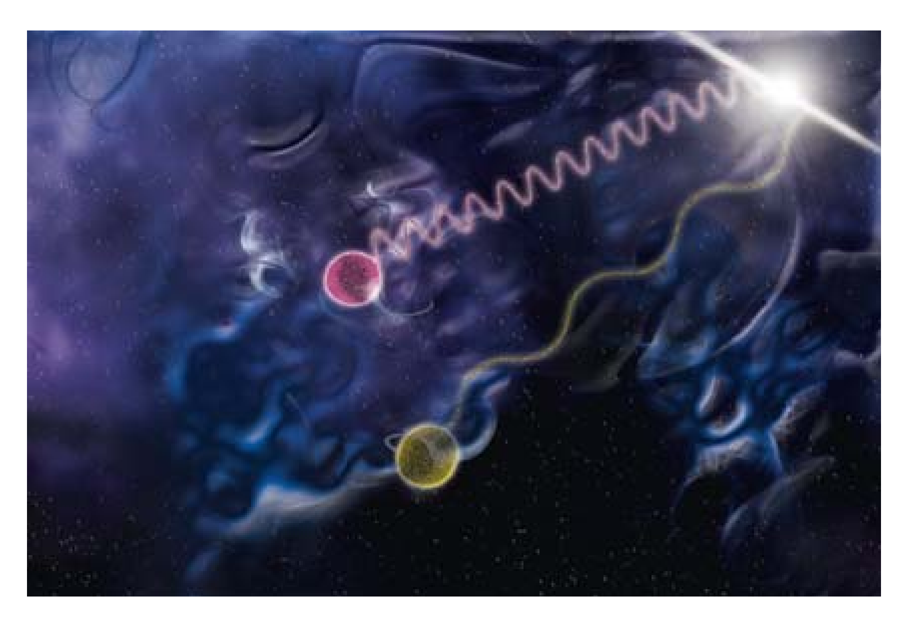
Pruebas de la invariancia de Lorentz a escala cósmica

El estudio de una explosión cósmica de rayos gamma impone severas restricciones a las teorías que postulan violaciones de la relatividad especial; entre ellas, ciertos modelos de gravedad cuántica

La teoría de la relatividad predice que determinados observables físicos han de satisfacer una propiedad muy especial: su magnitud debe permanecer idéntica en todos los sistemas de referencia inerciales. Dichos observables se denominan *invariantes de Lorentz*, en alusión al nombre que reciben las ecuaciones que «convierten» un sistema de referencia inercial en otro. Un ejemplo básico, quizás el más obvio, nos lo proporciona la constancia de la velocidad de la luz en el vacío. Cualquier experimento que demostrase que dicha magnitud depende del sistema de observación implicaría una ruptura de la invariancia de Lorentz y, por tanto, socavaría uno de los pilares de la teoría de la relatividad.

Sin embargo, algunas de las propuestas actuales para conjugar las leyes de la gravitación con las de la mecánica cuántica predicen que la simetría de Lorentz dejaría de resultar válida a distancias diminutas. Ello se debe a que tales modelos postulan una estructura «granular» del espaciotiempo, por lo que la simetría de Lorentz se perdería al sondear el espacio a la escala característica de dichos «gránulos». Por lo general, su tamaño se supone del orden de la longitud de Planck (unos 10^{-35} metros). Dichas distancias son tan ínfimas que, hoy por hoy, tales predicciones resultan imposibles de verificar en un laboratorio.

¿Qué consecuencias experimentales se derivarían de una ruptura de la invariancia de Lorentz? Una de ellas sería que la velocidad de la luz en el vacío pasaría a depender de la energía de los fotones. Así ocurre cuando la luz atraviesa un medio transparente: a su paso por un prisma, la luz blanca se descompone en los colores del arcoíris. Este fenómeno, denominado dispersión, se debe a que, en un medio material, el índice de refracción es distinto para los fotones de diferentes colores. Sin embargo, según la teoría de la relatividad, el espaciotiempo constituye una estructura suave y uniforme a todas las escalas. Ello implica que, con independencia de su energía, todos los fotones deberían desplazarse a la misma velocidad.



¿Carreras de fotones? La teoría de la relatividad predice que la velocidad de la luz en el vacío es una constante universal. No obstante, otras teorías postulan que los fotones de diferente energía o polarización deberían desplazarse a velocidades ligeramente distintas (*ilustración*). Hoy por hoy, tales variaciones resultarían imposibles de medir en un laboratorio, pero deberían traducirse en distintos tiempos de llegada a la Tierra para los fotones emitidos por fuentes cósmicas. Mediciones recientes han refutado, con un elevado grado de precisión, dicho supuesto.

NASA/UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONOMA/AURORE SIMONNET

El universo como laboratorio

En mayo de 2009, un fenómeno cósmico permitió poner a prueba este principio. La explosión de rayos gamma GRB 090510, que apenas duró unos segundos, fue observada de manera simultánea por una cohorte de telescopios orbitales. Uno de ellos, el telescopio Fermi, detectó fotones en un amplio intervalo de energías: desde algunos kiloelectronvoltios (keV) hasta 31 gigaelectronvoltios (GeV). Por otro lado, medidas tomadas desde el Gran Telescopio (Very Large Telescope), en el desierto chileno de Atacama, permitieron confirmar con precisión que la luz de dicha explosión había viajado por el universo durante más de 7000 millones de años.

El hecho de que fotones cuyas energías diferían en un factor de más de un millón nos alcanzaran simultáneamente (con un margen de un segundo) tras un viaje de tal magnitud permitió poner límites muy estrictos a la posible diferencia entre sus velocidades: del orden de una parte en 10^{17}, un resultado experimental de los más precisos que pueden obtenerse sobre cualquier magnitud física.

En caso de existir una ruptura de la simetría de Lorentz en el vacío, la velocidad de propagación de la luz podría depender también del estado de la polarización de los fotones. En consecuencia, la radiación parcialmente polarizada emitida por una fuente cósmica se iría despolarizando conforme los fotones viajaran más y más lejos, pues estos irían «perdiendo el paso».

Los modelos teóricos sobre la reacción de los fotones ante las posibles irregularidades del vacío predicen que dicho efecto debería resultar tanto más apreciable cuanto mayor sea la energía de los fotones. Para poner a prueba dicho pronóstico, necesitaríamos medir la polarización

de la luz de muy alta energía emitida desde distancias cósmicas. Por desgracia, este objetivo no se antoja nada fácil. No muchas fuentes emiten radiación lo suficientemente polarizada, y pocas lo hacen con la intensidad requerida. Hasta hace poco, las mejores medidas provenían de la nebulosa del Cangrejo (relativamente cercana, ya que se encuentra en la Vía Láctea) y de la cual nos llega radiación gamma de alta energía, así como de algunas fuentes extragalácticas no muy lejanas, observadas en el ultravioleta.

En fecha reciente, empleando medidas fotométricas, nuestro grupo de investigación estimó la distancia a la galaxia anfitriona de otra explosión de rayos gamma: GRB 041219A, una de las pocas en las que se ha observado una polarización apreciable en radiación de alta energía. A pesar de que nuestro resultado presentaba una gran incertidumbre, demostramos que dicha explosión debió ocurrir a una distancia de, al menos, unos 300 millones de años luz. Este dato nos permitió imponer un nuevo límite a las posibles violaciones de la invariancia de Lorentz que mejoraba en cuatro órdenes de magnitud los resultados previos referidos a la polarización. Los resultados fueron publicados en *Physical Review D* en junio del año pasado. En estos momentos nos encontramos a la espera de afinar la medida de la distancia utilizando el Gran Telescopio Canarias y otros telescopios terrestres.

Nuestras observaciones impusieron límites muy estrictos a las violaciones potenciales de la teoría de la relatividad especial. Poco después, sin embargo, se hicieron públicos los resultados de la colaboración OPERA, la cual refirió la propagación de neutrinos a velocidades superlumínicas. A fecha de hoy, parece que dicha observación podría deberse a un error experimental. Con todo, cualquier modificación en el límite de altas energías, tiempos breves o pequeñas distancias deberá realizar predicciones que puedan reconciliarse con todas las pruebas observacionales acumuladas hasta la fecha.

—Alberto Fernández Soto
Instituto de Física de Cantabria
Universidad de Cantabria/CSIC

GENÉTICA

Edición de genes: una nueva herramienta para la biología molecular

La edición del genoma mediante nucleasas obtenidas por ingeniería genética está revolucionando la investigación biológica. De ahí que haya ganado el título de método del año 2011

Editar el genoma de forma precisa constituye una poderosa herramienta para la investigación de los procesos biológicos. Las levaduras, por ejemplo, han sido un sistema increíblemente útil en parte porque la recombinación homóloga (recombinación entre secuencias idénticas o casi idénticas de ADN) permite modificar su genoma con precisión y eficiencia. A su vez, la capacidad para dirigirse hacia un gen concreto mediante recombinación homóloga en células madre embrionarias de ratón revolucionó los estudios genéticos en estos roedores, un logro que fue reconocido con la concesión del premio Nobel de medicina a Mario Capecchi y Oliver Smithies, creadores de esta técnica. Sin embargo, en otros sistemas la edición precisa del genoma se ha visto limitada, fundamentalmente, por su escasa eficiencia. Por suerte, este panorama está cambiando. Gracias en parte a su interés clínico, durante el último decenio se ha desarrollado la edición eficaz del genoma en una gama más amplia de sistemas experimentales; hoy esta técnica está llamada a convertirse en una estrategia experimental más para la manipulación de genes en los laboratorios de investigación.

El desarrollo de la técnica

La edición de genes en células de mamífero experimentó un empuje decisivo en 1996 gracias a Maria Jasin, del Instituto Sloan-Kettering y la Universidad de Cornell. Estos investigadores descubrieron que, en las células de mamífero, una rotura de la doble hebra del ADN específica para un gen podía estimular por lo menos en tres órdenes de magnitud la localización del gen mediante recombinación homóloga. En su trabajo utilizaron la endonucleasa doméstica (*homing endonuclease*) I-SceI, pero las nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética provocan un efecto parecido. Esta tremenda estimulación a la hora de localizar un gen es el resultado de aprovechar la maquinaria natural de recombinación homóloga que posee la célula para la reparación de las roturas bicatenarias. En 2002, Dana Carroll y sus colegas, de la facultad de medicina de la Universidad de Utah, demostraron que las nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética podían generar mutaciones y alterar genes utilizando la ruta de reparación de la propia célula que se encarga de unir extremos no homólogos (NHEJ, por sus siglas en inglés) y que es propensa a la mutagénesis.

Por tanto, la edición de genes surge de combinar la acción de las nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética para crear roturas bicatenarias en los lugares del genoma deseados con los mecanismos de reparación de tales roturas desplegados por la célula. En principio, las dos rutas de reparación celular (recombinación homóloga y NHEJ) podrían utilizarse para alterar prácticamente cualquier gen que interese.

En la actualidad existen tres formas de crear nucleasas «a la carta»: rediseñar mediante ingeniería genética las endonucleasas domésticas, las nucleasas con dominios de dedo de zinc (ZFN, por sus siglas en inglés) y las nucleasas efectoras similares a los activadores de la transcripción (TALEN, por sus siglas en inglés). Aunque los mejores resultados se han cosechado con las ZFN, es posible editar el genoma con los tres tipos de nucleasas. Tal vez las TALEN acaben desbancando a las ZFN en su condición de favoritas, porque se ensamblan con mayor facilidad y poseen prácticamente la misma actividad. Pero es muy probable que tanto las ZFN como las endonucleasas domésticas modificadas sigan desempeñando un cometido importante.

Mutación génica dirigida

La alteración o la eliminación de un gen resulta crucial para el conocimiento de proteínas y rutas de interés. Hoy en día, en células de mamífero, la alteración de genes suele llevarse a cabo con ARN interferentes pequeños, o de cadena corta (ARNip). Pero la eliminación mediante ARNip puede resultar incompleta y variable, y es preciso supervisar el proceso para detectar posibles efectos indeseados en otros genes. Las nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética representan, en potencia, una excelente alternativa. Se puede utilizar una nucleasa dirigida y la NHEJ mutagénica para introducir pequeñas inserciones o deleciones en un lugar concreto del genoma, inactivando así un gen o un elemento genómico. De modo alternativo, se pueden introducir cambios específicos en un lugar concreto del genoma mediante recombinación homóloga tras abrir una escisión con la nucleasa; este tipo de cambios podría inactivar un gen, activarlo o dotarlo de una nueva función. Tales procesos podrían dirigirse bien hacia genes que codifican proteínas, bien hacia genes que no las codifican. Por ejemplo, en células de ovario de hámster chino se han utilizado ZFN para mutar los dos alelos del gen de la dihidrofolato reductasa con el fin de mejorar la producción de proteínas recombinantes. También se han creado células sanguíneas humanas resistentes al VIH mutando el gen del correceptor CCR5, resorte de entrada del virus.

La frecuencia de la NHEJ mutagénica posterior a la rotura inducida por nucleasa (por lo común superior al 10 por ciento con un buen par de nucleasas) o de la localización de un gen mediante recombinación homóloga tras una rotura de igual naturaleza (que suele superar el 1 por ciento con un buen par de nucleasas) significa que ambas estrategias pueden, con una planificación adecuada, aplicarse en numerosas situaciones experimentales. Y cuando las nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética son muy activas, la tasa de modificación de los alelos puede llegar a ser de un 40 por ciento, lo que hace que sea relativamente sencillo encontrar células en las que uno o ambos alelos estén alterados. Además, si la tasa de mutación génica es lo bastante elevada, las nucleasas diseñadas a la carta pueden utilizarse en serie para crear una estirpe celular desprovista de más de un gen. Es posible imaginar refinados sistemas inducibles y reversibles en los que se puedan eliminar genes combinando las nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética con métodos de recombinación estándar (Cre-*lox,* Flp-*FRT*, o ambos) para conseguir un control aún más fino.

Reordenamientos cromosómicos

Además de generar pequeñas mutaciones dirigidas para estudiar la función de los genes, las nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética pueden utilizarse para eliminar grupos enteros de genes a un mismo tiempo. Por regla general, las deleciones grandes se consiguen con menos frecuencia que las pequeñas, pero el proceso sigue siendo lo bastante robusto como para ser de utilidad. En fecha reciente, para conseguir grandes deleciones, Gregory D. Davis y sus colaboradores, de Sigma-Aldrich Biotechnology, en Missouri, utilizaron oligonucleótidos de ADN monocatenario diseñados para servir de moldes que abarcaban tanto el lugar de unión de la nucleasa como un lugar distal del ADN situado en el mismo cromosoma. Pueden utilizarse nucleasas diseñadas para cromosomas distintos para que, actuando en parejas, se produzcan translocaciones cromosómicas. Células primarias portadoras de translocaciones que imiten a las que provocan enfermedades humanas, especialmente el cáncer, podrían representar un excelente método para comprender mejor cómo contribuyen estas translocaciones al desarrollo de la enfermedad.

Marcaje endógeno de genes

Las estirpes celulares estables son la mano de obra de la investigación biomédica moderna. Constituyen herramientas de gran importancia para una miríada de estudios. En el futuro, el uso de nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética debería cambiar la forma en que se producen estas estirpes. Los protocolos tradicionales, en que los transgenes se integran aquí y allá sin control y, a menudo, en forma de multímeros, presentan varios inconvenientes.

En primer lugar, para dirigir la expresión génica se necesita un citomegalovirus (CMV) u otro promotor, y estos suelen provocar la síntesis de cantidades anormales de proteína, si lo comparamos con la expresión regida por un promotor endógeno. Además, el uso de un promotor artificial desbarata por completo la regulación normal de la transcripción del gen, incluida la regulación por retroinhibición. En segundo lugar, como por regla general el transgén se integra de forma aleatoria, el efecto biológico puede estar relacionado con el lugar de integración en vez de con el propio transgén.

En 2011, dos grupos utilizaron la técnica de marras para añadir un marcador fluorescente a un gen endógeno. El estudio llevado a cabo por Jeffrey B. Doyon y sus colaboradores, de la Universidad de California en Berkeley, resulta especialmente revelador. Demuestra que, mediante el marcaje del gen endógeno, se obtiene una visión de la dinámica de los endosomas en células de mamífero distinta de la que se obtenía utilizando la expresión ectópica estándar de una proteína de fusión fluorescente: el proceso endocítico resulta

Edición del genoma mediante una única pareja de nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética. Tras generar una rotura de la doble hebra se puede diseñar toda una gama de modificaciones genómicas. La edición de genes se puede llevar a cabo en estirpes celulares, en células primarias (incluidas las células madre somáticas y pluripotentes) y en oocitos fecundados para generar animales transgénicos.

FUENTE DE LOS GRÁFICOS: «GENE EDITING: NOT JUST FOR TRANSLATION ANYMORE», M. A. McMAHON, M. RAHDAR Y M. PORTEUS EN *NATURE METHODS*, VOL. 9, N.º 1, PÁGS. 28-30, ENERO DE 2012

más eficiente cuando se estudia mediante la proteína marcada de forma endógena. En este caso, parece ser que el mantenimiento de la estequiometría de la proteína endógena resulta esencial para el estudio de la dinámica de este proceso celular tan estrictamente regulado.

De manera similar, Dirk Hockemeyer y sus colaboradores, del Instituto Whitehead de Investigación Biomédica de Massachusetts, han utilizado TALEN para generar en células madre pluripotentes humanas una proteína de fusión formada por Oct4 a la que se le había añadido en el extremo carboxilo una proteína fluorescente verde. Aunque ambos estudios centran su interés en la expresión de proteínas de fusión fluorescentes con vistas a su empleo en microscopía de células vivas, resulta fácil imaginar otras aplicaciones. Así, en vez de una proteína fluorescente podría añadirse un epítopo o un marcador de afinidad.

Dos parejas de nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética
Dos roturas bicatenarias inducidas por nucleasas (en el mismo cromosoma)
Dos roturas bicatenarias inducidas por nucleasas (en cromosomas distintos)
Células primarias
Estirpes celulares
Deleción cromosómica inducida por nucleasas
Translocación cromosómica inducida por nucleasas
Oocito fecundado
Animales transgénicos

Edición del genoma mediante dos parejas de nucleasas obtenidas con ingeniería genética. Pueden generarse grandes reordenamientos cromosómicos utilizando dos parejas de nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética para crear roturas bicatenarias. Estos reordenamientos están diseñados para que se produzcan en lugares diana específicos para las nucleasas y deberían distinguirse de los reordenamientos involuntarios que podrían producirse en el caso de que se corte en lugares distintos de la diana. Los reordenamientos podrían generarse en líneas celulares, en células primarias (incluidas las células madre somáticas y pluripotentes) y durante la generación de animales transgénicos.

Adición dirigida de transgenes

Una alternativa al marcaje endógeno de genes consiste en dirigir la inserción de un transgén hacia un lugar determinado. Ciertas estirpes celulares se han construido con este propósito (por ejemplo, el sistema T-REx en células HEK293, fabricado por Invitrogen), pero no permiten dirigirse hacia un mismo locus en múltiples tipos celulares. Actuar sobre un gen específico por medio de nucleasas es una estrategia válida para engendrar estirpes celulares isogénicas, portadoras de un gen o alelo de interés integrado en idéntico lugar del genoma y sometido al control de idénticos elementos reguladores. Este método permite discernir diferencias sutiles en la función génica que pasarían inadvertidas en estirpes celulares estables fabricadas mediante las técnicas al uso. Mediante técnicas de ingeniería genética se han creado nucleasas que actúan en multitud de loci, incluidos los CCR5 y AAVS1 de células humanas, los cuales pueden actuar como robustos lugares de integración para los transgenes. En los próximos años seguro que se desarrollarán nucleasas para muchos otros loci con este propósito.

Una variante de esa estrategia consiste en utilizar las nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética para estimular el proceso de dirigirse hacia un gen concreto, de modo que la expresión de los transgenes dependa de los elementos reguladores endógenos del gen diana y no de un promotor artificial. Por ejemplo, podría dirigirse un gen antiapoptótico hacia el locus de la insulina de manera que solo se exprese en las células productoras de dicha hormona. Si no se utilizase la edición del genoma mediada por nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética, este tipo de experimento sería difícil en células humanas.

Alteraciones en la región reguladora

La edición de genes no tiene por qué limitarse a las regiones codificantes de los genes que codifican proteínas o a los elementos funcionales de los genes de ARN (como los microARN o los genes de ARN estructural). También puede ir dirigida hacia las regiones reguladoras para crear cambios específicos en los elementos promotores o intensificadores. Por ejemplo, para estudiar el papel que desempeña un determinado factor de transcripción en la regulación de un gen concreto, podría utilizarse la edición de genes para alterar el lugar de unión del factor de transcripción o para realizar modificaciones en el propio factor de transcripción. La edición de genes también podría utilizarse para añadir a la región promotora de un gen elementos reguladores, como lugares de unión para factores de transcripción específicos o para un represor del tipo de las tetraciclinas que haga que la expresión del gen sea inducible. Por último, la edición del genoma mediada por nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética podría utilizarse para añadir o extraer lugares de unión a los microARN, lo que supondría otra forma de manipular la expresión de un gen endógeno.

Aplicaciones celulares

Es probable que las mejoras en los métodos para realizar modificaciones genómicas precisas en las células resulten beneficiosas para el estudio de casi cualquier proceso biológico, pero merece la pena resaltar la posible sinergia entre esta técnica y ciertas áreas cruciales. En primer lugar, la biología sintética, cuyo objetivo consiste en diseñar células y organismos que desempeñen nuevas funciones. Las nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética podrían utilizarse para añadir o extraer elementos genómicos específicos, para crear mediante una estrategia iterativa sistemas cada vez más complejos o para añadir conjuntos completos de genes que conformen una ruta metabólica en el interior de una célula.

En segundo lugar, debemos considerar el impacto de la nueva técnica en la investigación con células madre. A medida que los métodos para diferenciar las células madre pluripotentes humanas en otros tipos celulares siguen refinándose, la modificación génica dirigida (ya sea para estudiar la diferenciación o para modelizar enfermedades) formará parte, sin duda, del arsenal de herramientas que permitirán ensayar en células madre la

función de genes. De hecho, ya se han utilizado las nucleasas para generar estirpes celulares pluripotentes, específicas para cada paciente, que portan mutaciones causantes de enfermedades o para corregir en células madre este tipo de mutaciones.

Animales transgénicos

La edición de genes mediada por nucleasas se ha utilizado para crear animales transgénicos en diversas especies (*Drosophila melanogaster*, el pez cebra, ratones, ratas y conejos, entre otros). Y la lista sigue creciendo. Esta técnica amplía el espectro de especies en que se puede utilizar la transgénesis como herramienta experimental y podría resultar de gran importancia a la hora de realizar descubrimientos. Podrían emplearse estrategias transgénicas mediadas por nucleasas en cualquier especie en la que sea posible extraer oocitos fecundados, inyectarlos y luego implantarlos, y de la que se disponga de suficiente información sobre su secuencia. La frecuencia de la edición de genes en los oocitos parece ser lo bastante elevada como para poder utilizar la mayoría de las estrategias de edición descritas —excepto quizá la inducción de translocaciones cromosómicas—, pero ahora en el contexto de un organismo completo. Un uso más generalizado de la edición de genes para crear animales transgénicos podría permitir la creación de mejores modelos para la fisiología humana y dar lugar, mediante la introducción por ingeniería genética de identificadores del linaje, a nuevos conocimientos sobre el proceso del desarrollo.

Reparación del ADN

Otra aplicación, bastante distinta, de las nucleasas obtenidas mediante ingeniería genética consiste en el estudio del modo en que se reparan las roturas bicatenarias genómicas. Con objeto de crear tales roturas, los investigadores han venido usando sobre todo agentes inespecíficos y rudimentarios como la radiación ionizante. Pero es posible utilizar las nucleasas fabricadas a la carta para crear roturas bicatenarias en distintas condiciones experimentales y en lugares y momentos específicos, lo que debería ayudar a comprender mejor el proceso de reparación. Dada la importancia de la reparación de las roturas bicatenarias en el cáncer, este enfoque podría resultar de gran utilidad.

—Moira A. McMahon, Meghdad Rahdar
y Matthew Porteus
Universidad Standford

Artículo original publicado en el dossier especial «Method of the year 2011» de *Nature Methods*, vol. 9, págs. 28-31, 2012. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2012

FÍSICA

Radiografías por contraste de fase

Una nueva técnica de rayos X augura una resolución mayor sin necesidad de aumentar las dosis de radiación

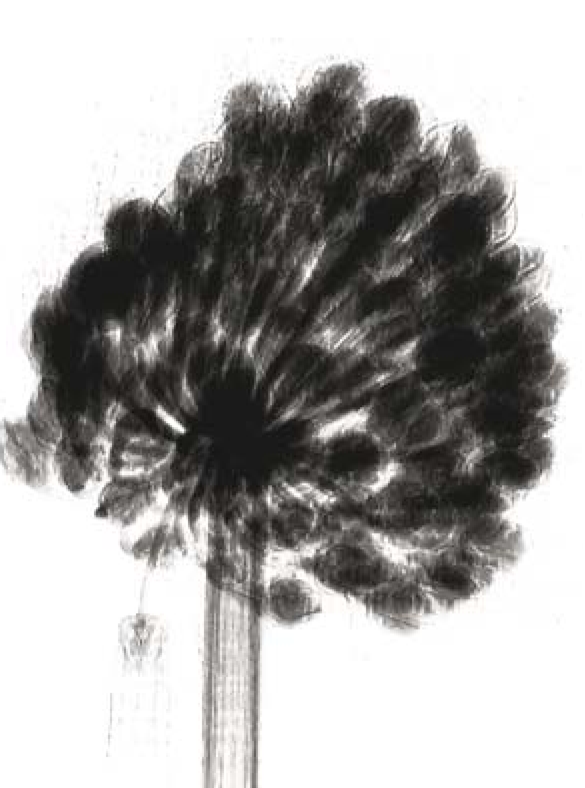
Los rayos X pueden localizar desde bombas escondidas en el equipaje hasta tumores de mama. Sin embargo, siempre existen detalles del objeto que se antojan demasiado sutiles como para que los dispositivos tradicionales puedan detectarlos. Una nueva técnica de rayos X, desarrollada a partir de otra empleada en los aceleradores de partículas, quizá permita resolver algunos detalles que hasta ahora se consideraban inobservables.

Las radiografías funcionan en buena parte de la misma manera que la fotografía tradicional: a partir de la luz que absorbe, transmite y dispersa un objeto. Para obtener una gran resolución, suele necesitarse una gran cantidad de rayos X. Esta puede conseguirse mediante una exposición continuada, lo que puede implicar niveles perjudiciales de radiación, o bien de una sola vez gracias a una fuente de potencia elevada, como los sincrotrones, muy costosos.

Ahora, Alessandro Olivo, físico del Colegio Universitario de Londres, y sus colaboradores proponen captar imágenes de un objeto a partir de las pequeñas desviaciones que experimentan los rayos X que lo atraviesan. La idea se basa en adaptar, para el caso de los dispositivos usuales de rayos X, el mismo procedimiento de toma de imágenes por contraste de fase que se ha venido empleando en los sincrotrones desde hace más de 15 años.

Junto a una fuente tradicional de rayos X, la técnica emplea rejillas de oro de unos 100 micrómetros de espesor. Una se coloca delante del objeto que se desea radiografiar; la otra, detrás. Los orificios de ambas rejillas no se alinean entre sí a la perfección, por lo que los rayos X que, tras haber pasado por la primera, atraviesen el objeto sin desviarse serán eliminados por la segunda. Esto reduce el ruido de la señal. El detector analiza entonces únicamente los fotones que se desviaron al atravesar el objeto. El método logra una resolución al menos 10 veces mayor que la de las radiografías tradicionales.

«Todo se aprecia con mayor claridad y resulta posible detectar algunos detalles que, hasta ahora, se consideraban muy difíciles de resolver», explica Olivo sobre sus hallazgos, publicados en fecha reciente en la revista *Applied Optics*. Una radiografía normal suele bastar para descubrir una bomba escondida entre el equipaje, pero en ocasiones también puede confundirla con otros materiales, como plásticos o líquidos. Los expertos intentan ahora aumentar aún más la sensibilidad del método. A tal fin, se encuentran investigando



Radiografía de una planta de cebollino, realizada por Alessandro Olivo.

CORTESÍA DE ALESSANDRO OLIVO ET AL./COLEGIO UNIVERSITARIO DE LONDRES

técnicas tridimensionales en las que el objeto se enfoca desde varios ángulos.

El procedimiento genera imágenes en pocos segundos, una rapidez mucho mayor que la de otras técnicas de contraste de fase con rayos X, las cuales requieren irradiar el objeto durante varios minutos, según explica David Bradley, especialista de la Universidad de Surrey que no participó en el estudio. No queda claro, sin embargo, si el método podría funcionar con suficiente rapidez como para utilizarse en escáneres de seguridad, señala Philip Withers, físico de materiales de la Universidad de Manchester. Sin embargo, Withers sí cree que la técnica mejorará las aplicaciones médicas, así como los métodos de detección de pequeños defectos en los materiales de la industria aeroespacial.

—Charles Q. Choi

BOTÁNICA

¿Cuándo llega el polen?

Los brotes alérgicos pueden ocurrir antes y después de la polinización de las plantas locales, debido a la acción del viento, que trae polen procedente de especies lejanas

Para salvar la distancia entre los individuos, las especies vegetales han desarrollado un exitoso sistema de reproducción: incluyen sus gametos masculinos en unas estructuras muy resistentes, los granos de polen, y confían su diseminación a los animales (sobre todo insectos) y al viento. De esta manera, son transportados hasta las estructuras femeninas de otra o de la misma planta, donde tendrá lugar la germinación. En el caso del transporte por viento, la polinización resulta altamente ineficiente; ello implica que deben producirse y transportarse grandes cantidades de polen para que una pequeña parte del mismo pueda finalmente germinar.

Cerca del veinte por ciento de las familias de plantas con semillas son polinizadas por el viento (anemófilas); entre ellas, todas las gimnospermas. Pese a que esta fracción puede resultar reducida, muchas de estas plantas poseen una gran importancia en el paisaje natural, como las gramíneas y los árboles principales de los bosques templados y fríos; algunas se cultivan por su interés agrícola (olivos) y otras se utilizan con fines ornamentales en las ciudades (cipreses, plátanos de sombra).

Por todo ello, al acercarse la primavera, en las áreas de influencia mediterránea pueden alcanzarse valores de millares de granos de polen por metro cúbico de aire. Las consecuencias de esta presencia masiva las sufren cada día más personas, puesto que los casos de alergia al polen aumentan cada año en los países industrializados, sobre todo en las áreas urbanas.

Aerobiología y fenología

La aerobiología estudia la presencia de polen y esporas en el aire. Asimismo, analiza las causas de esa variación espacial y temporal, y realiza pronósticos que puedan ayudar a prevenir brotes alérgicos. El desarrollo de redes aerobiológicas que ponen en común los datos recogidos en diversas localidades resulta, pues, de gran utilidad para la salud pública. La Red Española de Aerobiología está formada por el conjunto de centros, en su mayoría universitarios, que realizan un seguimiento continuo del polen del aire. Los datos son compartidos también a nivel europeo y la información se difunde a médicos alergólogos y público en general. El centro coordinador se encuentra en la Universidad de Córdoba (www.uco.es/rea).

La presencia de polen en el aire depende de la abundancia y distribución de las plantas que lo producen, de su época de polinización y de factores ambientales como la meteorología. En concreto, el viento desempeña un papel de suma importancia, por su efecto dispersor [*véase* «El viento y la dispersión de las plantas», por Ángel M. Felicísimo y Jesús Muñoz; Investigación y Ciencia, julio de 2010]. El análisis del polen aerovagante se realiza mediante captadores que toman muestras de aire de forma continua durante todo el año.

La mayoría de los pólenes presentan una marcada estacionalidad, variable de un año a otro según la meteorología. A este período de máxima concentración se le denomina estación polínica. En principio, podría pensarse que el polen recogido corresponde a las plantas en polinización presentes en un área de influencia de unas decenas de kilómetros. Sin embargo, el viento puede transportar el polen largas distancias. Por ello resulta de gran interés


Vulpia geniculata


Cañota o sorgo (*Sorghum halepense*)


Ballico (*Lolium rigidum*)


Jopillos de monte o dáctilo (*Dactylis glomerata*)

La mayor parte del polen del aire procede de un número reducido de especies vegetales. Entre ellas, las de las fotografías, todas abundantes en la región mediterránea.

RAFAEL TORMO



Captador de polen sobre la azotea del edificio de biología de la facultad de ciencias de la Universidad de Extremadura en Badajoz.

complementar la información aerobiológica con estudios fenológicos que analicen la influencia de las variaciones atmosféricas en la polinización.

Polen viajero

Esos estudios han mostrado que en muchos casos se recoge polen del aire antes y después de los períodos de polinización de las plantas locales. La proporción de este polen foráneo respecto del total es reducida, menos del diez por ciento; sin embargo, puede tener efectos en los procesos alérgicos. El polen del inicio de la estación polínica (registrado antes de la polinización de las plantas de los alrededores) puede corresponder a plantas más meridionales que han iniciado antes la floración. El del final de la estación polínica quizá provenga de plantas más septentrionales que polinizan más tarde, pero una buena parte se debe a fenómenos de resuspensión del polen local, como lo atestigua el incremento de la proporción de granos deteriorados.

Ese fenómeno se ha observado sobre todo en árboles cultivados (olivos, cipreses y plátanos de sombra) así como espontáneos (encinas y alcornoques). En las plantas herbáceas, sin embargo, no resulta tan evidente debido a su gran dependencia del agua de lluvia estacional. En el caso de las gramíneas se ha descubierto que, pese a existir un importante número de especies que polinizan hacia el final del invierno o inicios de la primavera, son tan solo unas pocas las responsables de la mayor parte del polen en el aire: *Dactylis glomerata*, *Trisetum paniceum*, *Piptatherum miliaceum, Rostraria cristata, Vulpia geniculata* y *Lolium rigidum* en primavera, y *Sorghum halepense* y *Cynodon dactylon* en verano, todas ellas abundantes en la región mediterránea.

Esas observaciones proceden de un trabajo que llevamos a cabo en nuestro grupo de investigación en aerobiología (www.aerouex.es) y cuyos resultados se publicaron en 2011 en el número 55 de la revista *International Journal of Biometeorology*. Nos propusimos analizar la correlación entre el polen del aire y la floración (o polinización) para los tipos de polen más abundantes en el área de Badajoz: cipreses, plátanos, encinas, llantenes, olivos y gramíneas, con un total de 35 especies. Para ello controlamos la floración en siete puntos, algunos con vegetación seminatural y otros en enclaves urbanos. Recogimos datos fenológicos cada semana, entre marzo y junio de 2007, y entre enero y junio de 2008 y 2009. Y obtuvimos los datos aerobiológicos mediante el captador que viene operando de forma continuada desde 1993 en la azotea de nuestro centro.

El estudio confirmó que, si bien el grueso del polen presente en el aire de una localidad corresponde siempre a las plantas cercanas, no se puede descartar la existencia de problemas de alergia antes y después de la polinización de estas plantas, debido a la presencia de polen aerotransportado desde otras localidades.

Para este año, dada la escasez de lluvias en invierno, se prevé una primavera con poco polen de plantas herbáceas, como las gramíneas, ya que su desarrollo y producción de polen está totalmente ligado a las precipitaciones de los meses previos a su polinización. Para el polen de las plantas leñosas estos fenómenos estarán más amortiguados.

—Rafael Tormo Molina, Ángela Gonzalo Garijo, Inmaculada Silva Palacios y Adolfo F. Muñoz Rodríguez
Grupo de investigación en aerobiología
Universidad de Extremadura

CONSERVACIÓN

El silencio de los cóndores

Las aves terrestres de mayor tamaño de Norteamérica, que en un tiempo estuvieron al borde de la extinción, se han recuperado de forma sorprendente

Los primeros cóndores de California reintroducidos en la naturaleza en cinco años dieron unos saltos vacilantes en un barranco de piedra arenisca, alargaron sus rosados cuellos para asomarse al precipicio y movieron con vacilación sus alas de tres metros de envergadura. Desde aquel momento excepcional en 1992, los biólogos han liberado casi doscientos cóndores nacidos y criados en cautividad, que han conseguido salir adelante. El censo mundial ha aumentado de 22 ejemplares en 1987 a 396 en la actualidad. Las poblaciones naturales se concentran en Baja California, Arizona y la parte meridional y central de California. Mientras estas rapaces gigantes vuelven a ocupar un territorio de veinte millones de kilómetros cuadrados, los científicos utilizan la más avanzada tecnología para conservar estos supervivientes del Pleistoceno. Se sirven también de tácticas poco usuales, como cambiar crías infértiles por otras fértiles para garantizar una recuperación total.

Desde su oficina en Ventura (California), Jesse Grantham, coordinador del programa de recuperación de los cóndores del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos, puede rastrear la situación de cada cóndor en California, con un error de solo unos metros. En cada una de las aves de unos ocho kilos de peso, el equipo de Grantham ha colocado un transmisor de radio y un dispositivo GPS alimentado con energía solar que envía más de mil señales diarias sobre la posición del cóndor. Si se reciben demasiadas señales de un mismo lugar durante un tiempo prolongado, ello indica que el cóndor se halla en apuros. Cuando así sucede, un equipo recorre a pie cañones remotos

RAFAEL TORMO

para hallar el ave enferma o muerta, a la que le realizan pruebas y analizan la carroña de la que se ha alimentado. Los datos del GPS también ayudan a localizar las cuevas en las que crían las rapaces, donde se puede verificar la viabilidad de cada huevo e incluso cambiar los huevos infértiles de los cóndores libres por otros huevos fértiles, puestos por aves que viven en cautividad.

El equipo de Grantham ha descubierto que los cóndores se enfrentan hoy a muchos de los mismos peligros que los amenazaban hace veinticinco años, en especial los fragmentos de balas de plomo que se hallan en la carroña que comen. Unos nueve de cada diez cóndores muestran niveles de plomo elevados, un problema que persiste a pesar de la prohibición de utilizar balas de este material en las zonas de California habitadas por el ave. Los tapones de botella, el DDT, las líneas eléctricas de alta tensión y los cazadores esporádicos representan también una amenaza, lo cual significa que el entorno sigue presentando todos los factores de riesgo que casi provocaron su extinción, afirma Grantham.

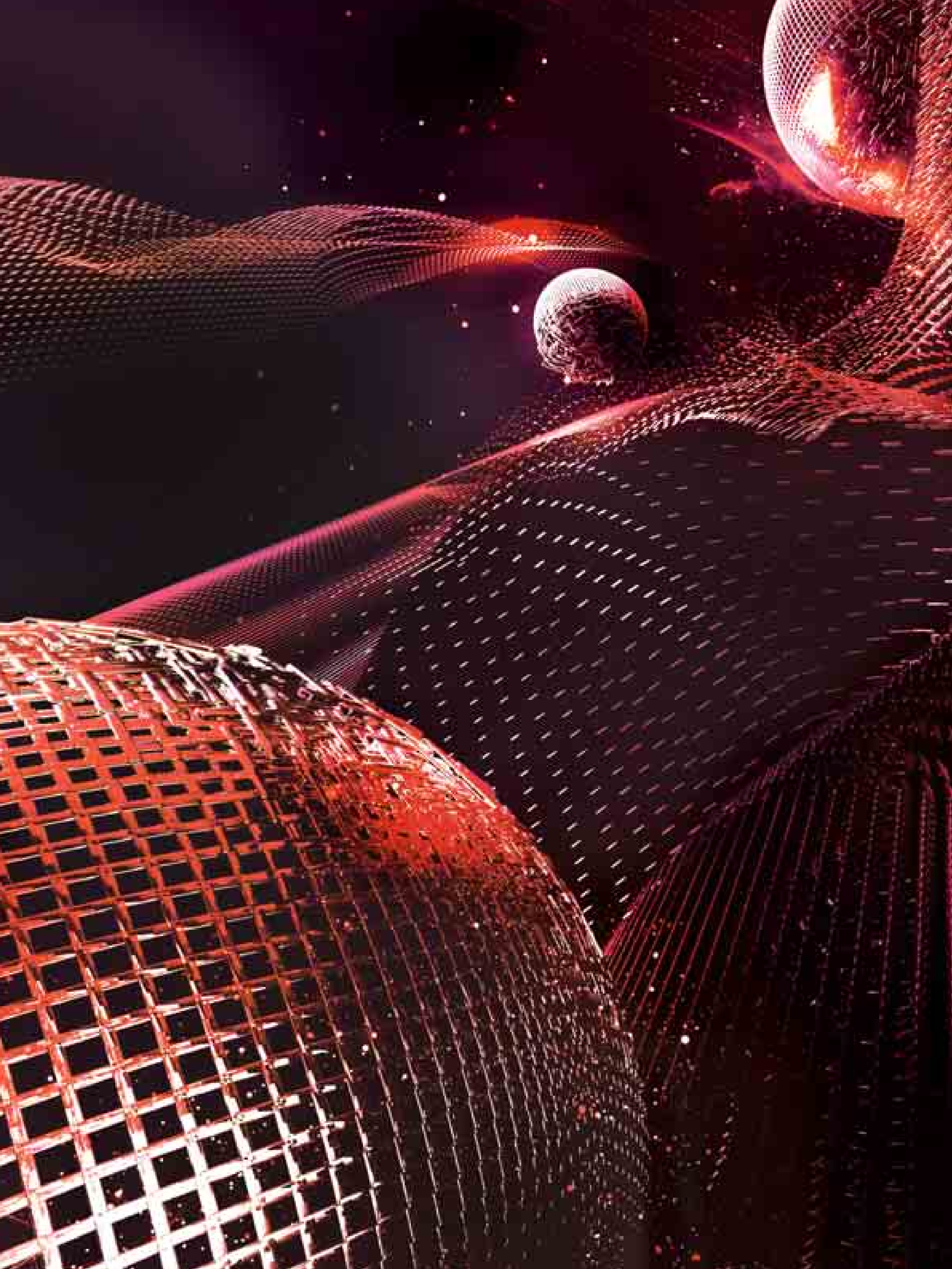
Cóndor de California

KONRAD WOTHE, MINDEN PICTURES (cóndor)

Gracias a los datos obtenidos por telemetría, los expertos están eliminando todos los peligros que pueden. Cerca de Big Sur (California), el rastreo mediante GPS mostró la existencia de un corredor de vuelo de cóndores desde Anderson Peak hasta el océano Pacífico, en un cañón en el que la compañía Pacific Gas and Electric (PG&E) mantiene una línea eléctrica de cinco kilómetros de longitud. Después de que tres cóndores murieran electrocutados, los datos de vuelo ayudaron a convencer a PG&E para que comenzara a soterrar la línea en agosto. En otros lugares, los científicos trabajan con empresas de energía solar y eólica para evitar las zonas de vuelo de los cóndores en los proyectos de parques energéticos. También han conseguido avances con respecto al problema del plomo, al pedir una ampliación de la prohibición de las balas de plomo y el cumplimiento estricto de la misma.

Y pronto se obtendrán más datos. Hay planes para instalar pequeños dispositivos que registren el latido cardiaco de los cóndores y la intensidad con la que baten sus alas, con el propósito de averiguar la forma en que la velocidad y la dirección del viento afectan a su consumo de energía. Comparando la información del vuelo con los datos meteorológicos, los científicos están averiguando el modo en que los cóndores se mueven por su entorno y qué lugares necesitan una mayor protección, señala Mike Wallace, del Instituto de Investigación para la Conservación, del Zoo de San Diego.

El programa para la recuperación del cóndor de California, con un coste anual de cinco millones de dólares, ha demostrado que es posible conseguir que estas rapaces vuelvan a reproducirse y a cuidar de sus crías con éxito en estado salvaje. Grantham y Wallace creen que los datos telemétricos ayudarán a garantizar que las poblaciones futuras sean autosuficientes, siempre que pueda solucionarse el problema del plomo. —*Jane Braxton Little*





FÍSICA

¿ES DIGITAL EL ESPACIO?

Un experimento explorará las conexiones más profundas entre espaciotiempo, materia e información. De tener éxito, podría redefinir las reglas de la física del siglo XXI

VAULT49

Michael Moyer



RAIG HOGAN CREE QUE EL MUNDO ES BORROSO. NO SE TRATA DE UNA METÁFORA: Hogan, físico de la Universidad de Chicago y director del Centro de Astrofísica de Partículas del Fermilab, piensa que si lográsemos escrutar las subdivisones más ínfimas del espacio y el tiempo descubriríamos que el universo posee un «temblor» intrínseco, una especie de zumbido permanente. Este no se debería a las partículas virtuales que en todo momento crea y destruye el vacío cuántico, ni a otras clases de «espumas» que los físicos han propuesto en el pasado para describir la estructura microscópica del espaciotiempo. El murmullo que Hogan pretende detectar existiría si el espacio se hallase compuesto por bloques elementales, o bits de información. Ese zumbido implicaría que el universo es digital.

Hogan me invita a visitar su máquina en una tarde ventosa de otoño. Una nave de color azul brillante se alza sobre la pradera ocre del campus del Fermilab, el único indicio de construcción nueva en este complejo de 45 años de antigüedad. Una tubería de 40 metros de longitud comunica la nave con un búnker que, durante décadas, albergó un cañón que disparaba partículas subatómicas hacia Minnesota. Ese recinto acoge ahora lo que Hogan denomina su «holómetro», el dispositivo con el que pretende amplificar el temblor del espaciotiempo.

Hogan toma una tiza y comienza a escribir en el muro de la nave. En una lección improvisada, me explica cómo pretende emplear unos cuantos láseres para amplificar la estructura fina del espacio. Comienza recordando la imposibilidad de conciliar las dos teorías más exitosas del siglo XX, la mecánica cuántica y la relatividad general: a la escala más ínfima posible, ambas se convierten en un galimatías. Sin embargo, esa misma escala parece especial por otra razón: se halla íntimamente ligada a la teoría de la información, los «unos y ceros» que codifican el universo. A lo largo de las últimas dos décadas, los físicos han adquirido una visión muy profunda sobre la manera en que el universo almacena información. Algunos han llegado a afirmar que es la información, y no la materia ni la energía, lo que constituye la unidad más básica de todo lo existente. La información vendría cifrada en bits minúsculos, a partir de los cuales emergería el cosmos.

Según Hogan, si tomamos dichas ideas en serio, deberíamos ser capaces de medir el temblor digital del espacio. Con ese fin, ha concebido un experimento que explorará el zumbido del universo a las escalas más diminutas. Hogan es el primero en admitir la posibilidad de que su holómetro no detecte nada nuevo. Entiende su proyecto como una sonda exploradora hacia lo desconocido: «No se pueden combinar la física del espaciotiempo y la mecánica cuántica para calcular lo que vamos a ver», concede. «Pero, para mí, esa es la razón para llevar a cabo el experimento: ir allí y ver lo que hay.»

¿Y si realmente detectase ese murmullo? Entonces el espacio y el tiempo no serían como creemos: «Cambiaría la arquitectura de la física», afirma.



urante las últimas décadas, la investigación en física de partículas no ha seguido esa senda exploratoria. El modelo estándar de las partículas elementales se formuló durante los años sesenta y principios de los setenta; desde entonces, los experimentos lo han venido corroborando con una profundidad y precisión crecientes. «La manera de proceder siempre ha partido de propuestas teóricas —como el bosón de Higgs— cuyas predicciones se veían luego descartadas o no por los experimentos», recuerda Hogan. Primero venía la teoría; después, el experimento.

Existen buenas razones para ese conservadurismo: los experimentos de física de partículas resultan extraordinariamente caros. Solo levantar el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, la máquina más compleja y precisa jamás construi-

EN SÍNTESIS

En lugar de suave y continuo, el espacio podría ser «digital», compuesto por bits diminutos. Sin embargo, los físicos siempre han pensado que la detección de dichos bits escapa a la tecnología actual.

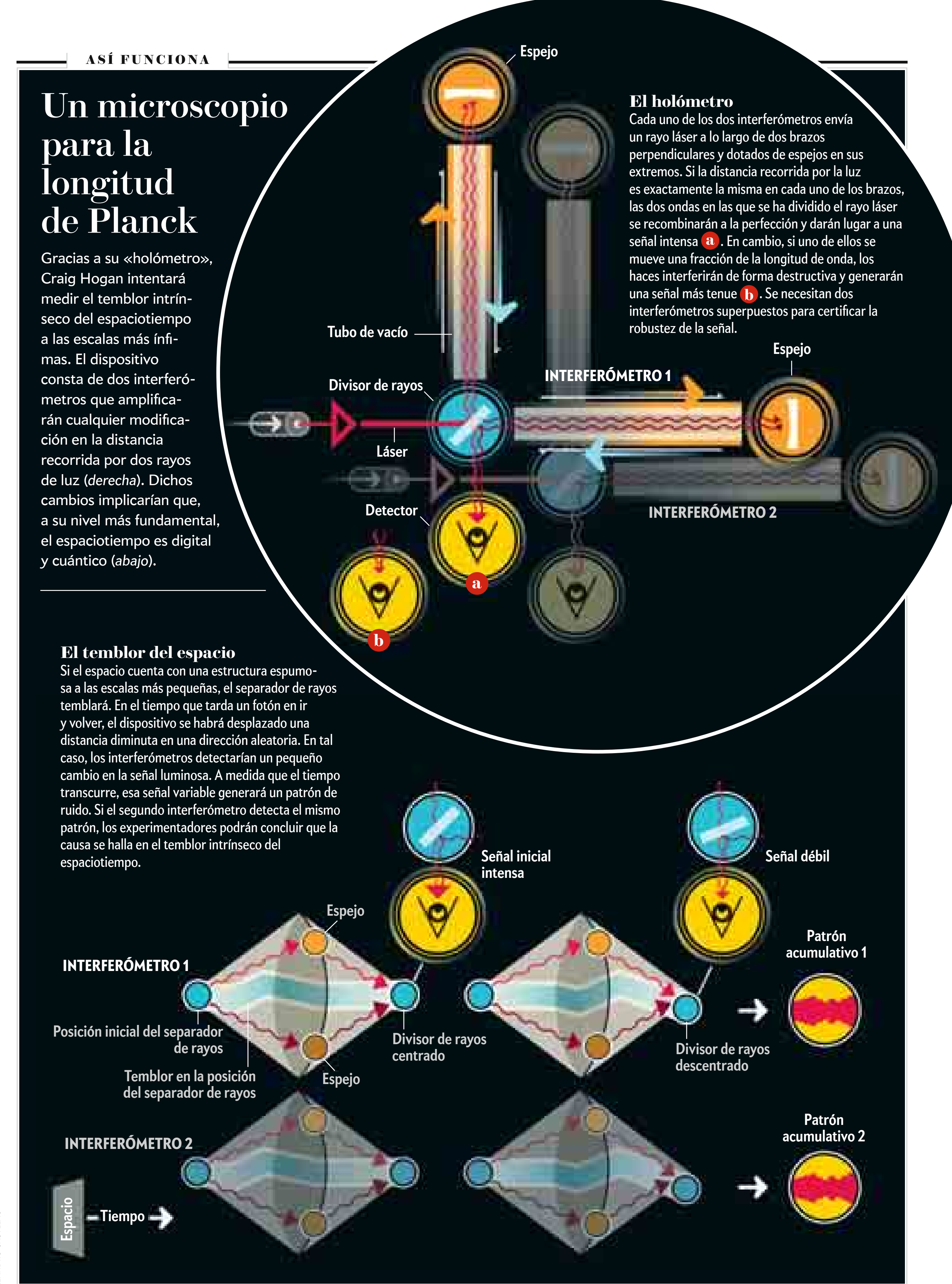
Craig Hogan, físico del Fermilab, ha ideado un montaje experimental que quizá le permita acceder a las escalas más pequeñas del espaciotiempo y desentrañar esa supuesta estructura digital.

Su «holómetro» investigará la hipótesis según la cual el universo emerge a partir de la información; en particular, de ciertos datos que se encontrarían codificados en superficies bidimensionales.

Si tiene éxito, el proyecto de Hogan transformaría nuestra comprensión del espaciotiempo. Ello podría guiarnos en el camino hacia la unificación de la relatividad general y la mecánica cuántica.

Un microscopio para la longitud de Planck

Gracias a su «holómetro», Craig Hogan intentará medir el temblor intrínseco del espaciotiempo a las escalas más ínfimas. El dispositivo consta de dos interferómetros que amplificarán cualquier modificación en la distancia recorrida por dos rayos de luz (*derecha*). Dichos cambios implicarían que, a su nivel más fundamental, el espaciotiempo es digital y cuántico (*abajo*).



LEANDRO CASTELAO

Información en una superficie

De acuerdo con el principio holográfico, el mundo tridimensional emerge a partir de la información que se encuentra codificada en ciertas superficies bidimensionales. Consideremos una manzana que cae en una habitación. Imaginemos que, en cierto instante, las paredes emiten un destello de luz dirigido hacia el centro de la sala. Esos rayos, que describen una burbuja que se contrae a la velocidad de la luz, barren una región denominada hoja de luz. El principio holográfico afirma que toda la información contenida en la hoja de luz (es decir, en toda la radiación y materia que los rayos se van encontrando a su paso) queda codificada en la superficie o burbuja inicial. Las hojas de luz también pueden obtenerse imaginando la luz emitida por el flash de una cámara situada en el centro de la habitación, cuyo destello se refleja en las paredes de la sala.

Paredes de la habitación

La luz reflejada desde las paredes se contrae hasta formar un punto.

Espacio

Tiempo

El flash de la cámara se dispara. La luz se expande hasta alcanzar las paredes. En ese tiempo, barre una región denominada hoja de luz.

Hoja de luz

La información de todo lo que contienen cualquiera de estas dos hojas de luz (como la manzana) se encuentra codificada en la superficie que definen los rayos de luz en el instante en el que rebotan contra las paredes.

LEANDRO CASTELAO

da, ya costó más de 3000 millones de euros; además, su funcionamiento requiere la participación de miles de físicos de todo el mundo. Los expertos se preguntan si la siguiente generación de aceleradores no resultará demasiado ambiciosa. Simplemente, la humanidad podría negarse a sufragarlos.

En un experimento típico del CERN pueden llegar a colaborar más de 3000 investigadores. En el Fermilab, Hogan ha reunido un equipo un tanto diverso que apenas cuenta con unos 20 miembros, una cifra que incluye a algunos asesores externos del Instituto de Tecnología de Massachusetts y la Universidad de Michigan. Hogan, un físico teórico poco familiarizado con los caprichos de las bombas de vacío o los láseres de estado sólido, ha contratado como codirector al físico experimental Aaron Chou. En verano de 2011 les fueron concedidos dos millones de dólares, una cantidad que en el LHC no alcanzaría para mucho más que un imán superconductor. Con ese dinero, Hogan piensa financiar todo el proyecto.

En parte, el holómetro resulta tan asequible porque supone una actualización de un experimento clásico: el que en el siglo XIX acabó con la noción de éter. Por aquel entonces, los físicos sabían que la luz se comportaba como una onda, un fenómeno que conocían muy bien. Y todas las ondas, desde las olas en un estanque hasta el sonido a través del aire, parecían requerir un medio por el que propagarse, por lo que concluyeron que debía existir un sustrato físico que permitiese la propagación de la luz. Esa sustancia, que había de ser invisible e impregnar todo el universo, recibió el nombre de éter.

En 1887, Albert Michelson y Edward Morley diseñaron un experimento para detectar el éter. A tal fin construyeron un interferómetro, un dispositivo formado por dos brazos dispuestos en forma de «L» y dotados de sendos espejos en sus extremos. Un rayo de luz se dividía en dos, los cuales viajaban a lo largo de los brazos, se reflejaban en los espejos y regresaban al punto de origen. Si el tiempo empleado por la luz en ir y volver a lo largo de cualquiera de los dos caminos cambiase siquiera una fracción de un microsegundo, la luz recombinada en el punto de partida brillaría con menor intensidad. Michelson y Morley instalaron su interferómetro y controlaron la luz durante meses, mientras la Tierra se movía alrededor del Sol. Dependiendo de la dirección en la que avanzase la Tierra y la orientación de los brazos, el éter debía alterar el tiempo que tardaba la luz en ir y volver a lo largo de cada camino. Bastaba con medir tales cambios para demostrar la existencia del éter.

Por supuesto, el interferómetro de Michelson y Morley no detectó nada, un resultado que inició la demolición de una cosmología que contaba con cientos de años de antigüedad. Pero, al igual que en un bosque calcinado por el fuego, la desaparición del éter posibilitó el florecimiento de una idea revolucionaria: sin él, la luz debía viajar siempre a la misma velocidad, con independencia del movimiento del observador. Ese principio su-

puso la base sobre la que, años después, Albert Einstein levantaría sus teorías de la relatividad.

El interferómetro de Hogan intentará detectar un telón de fondo que, al igual que el éter, también debería impregnar todo el universo. Con dos interferómetros superpuestos, Hogan se propone desentrañar la estructura del universo a las escalas más diminutas, la distancia a la cual la mecánica cuántica y la relatividad dejan de funcionar y la información se almacena en bits.

La mecánica cuántica y la relatividad general implican la existencia de una escala que, en cierto sentido, supone la mínima distancia posible: la longitud de Planck (unos 10^{-35} metros). Si tomásemos una partícula y la confinásemos en un cubo de arista menor que una longitud de Planck, su energía total sería tan elevada que su masa efectiva superaría a la de un agujero negro de ese mismo tamaño. Por otro lado, un agujero negro menor que una longitud de Planck carece de la masa suficiente para formar un cuanto de energía a su frecuencia natural. En la longitud de Planck reside la paradoja.

Pero la longitud de Planck representa mucho más que la escala a la que la mecánica cuántica y la relatividad se desmoronan. En las últimas décadas, el debate sobre la naturaleza de los agujeros negros ha traído consigo un punto de vista completamente nuevo sobre el significado de la escala de Planck. Puede que nuestras mejores teorías fallen a tales distancias, pero algo distinto aparece en su lugar. De acuerdo con esta hipótesis, la esencia del universo es la información, y esta se almacena en bits que «viven» en la escala de Planck.

«Información significa distinción entre cosas», explicaba Leonard Susskind, físico de la Universidad Stanford, en una conferencia en la Universidad de Nueva York el verano pasado. «Y en física, un principio muy básico afirma que las distinciones nunca desaparecen. Pueden distorsionarse o mezclarse, pero nunca desvanecerse». En el caso de que esta revista se convierta en pasta de papel en una planta de reciclado, la información contenida en sus páginas se reorganizará, pero no se eliminará. Al menos en teoría, el proceso de descomposición puede revertirse, por lo que cabría recomponer las palabras y las imágenes a partir de la pasta de papel.

Los físicos siempre han coincidido a la hora de aceptar tal principio, salvo en un caso muy especial: ¿qué ocurriría si arrojásemos la revista al interior de un agujero negro? Después de todo, nada puede salir de allí. Si un agujero negro engulle estas páginas, seguirá exactamente igual que antes, apenas unos gramos más pesado. En 1975, Stephen Hawking demostró que los agujeros negros radian materia y energía (en la forma que hoy denominamos radiación de Hawking); sin embargo, dicha radiación parecía carente de estructura. Esto llevó a Hawking a concluir que los agujeros negros destruyen la información de todo lo que cae en ellos. Pero físicos teóricos como Susskind o Gerard 't Hooft, quien años después recibiría el premio Nobel, manifestaron su desacuerdo. Según Susskind, la estructura de todo lo que conocemos se vendría abajo si se abriese el menor resquicio al concepto de pérdida de información.

Durante las dos décadas siguientes, los físicos desarrollaron una teoría que podía dar cuenta de la discrepancia. Esta se basa en el principio holográfico, según el cual la información de un objeto que se precipita en un agujero negro queda, de alguna manera, grabada sobre una superficie en torno al agujero negro. Por tanto, y si dispusiésemos de las herramientas adecuadas, el contenido de la revista podría reconstruirse a partir una inspección cuidadosa del sistema, tal y como podríamos hacer en la planta de reciclaje. El horizonte de sucesos del agujero negro (el punto de no retorno) vendría a desempeñar la función de un libro de contabilidad que registrase la información.

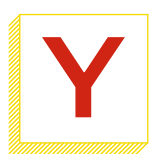
Pero el principio holográfico constituye algo más que un truco de contabilidad. Implica que, aunque el mundo parece contar con tres dimensiones espaciales, toda su información se almacena en superficies bidimensionales [*véase* «Información en el universo holográfico», por Jacob D. Bekenstein; Investigación y Ciencia, octubre de 2003]. Es más, existe un límite para la cantidad de información que puede almacenarse en una superficie dada: si la dividimos en casillas cuadrangulares de dos longitudes de Planck de lado cada una, la cantidad de información que podemos codificar en la superficie quedará limitada por el número de casillas.

En una serie de artículos publicados en 1999 y 2000, Raphael Bousso, actualmente en la Universidad de California en Berkeley, extendió el principio holográfico más allá de las superficies simples que rodean a los agujeros negros. Imagine un objeto rodeado de lámparas que, en cierto momento, emiten un destello. Los rayos que viajan hacia el interior describen una burbuja que se contrae a la velocidad de la luz. Esos rayos barren lo que denominamos una hoja de luz. En la formulación de Bousso, toda la información contenida en la hoja de luz (es decir, en toda la radiación y materia que los rayos se van encontrando a su paso) queda codificada en la superficie o burbuja inicial.

De acuerdo con el principio holográfico, la información relativa a cada electrón, quark o neutrino contenido en una hoja de luz se almacena en la superficie correspondiente. Sin embargo, incurriríamos en un error si creyésemos que dicha superficie se comporta como una película que se limita a registrar lo que sucede en la hoja de luz. Lo fundamental es la superficie: la información contenida en ella se proyecta sobre el mundo y crea todo lo que vemos. Según algunas interpretaciones, dicha superficie no solo genera las fuerzas y las partículas, sino también la estructura misma del espaciotiempo. «Creo que el espaciotiempo se corresponde con un fenómeno emergente», opina Herman Verlinde, físico de la Universidad de Princeton y antiguo alumno de 't Hooft. «Surge de un puñado de unos y ceros.»

No obstante, existe un problema: aunque la mayoría de los físicos teóricos aceptan que la información sobre nuestro mundo se encuentra contenida en dichas superficies, nadie sabe qué código emplea la naturaleza para cifrar esa información. Desconocemos cómo se procesan esos unos y ceros, así como la manera en que ese mecanismo da lugar al mundo. Puede que el universo funcione como un ordenador cuya información engendra lo que percibimos como realidad física; pero, por el momento, ese ordenador es una caja negra.

El gran atractivo del principio holográfico radica en que articula una conexión profunda entre información, materia y gravedad. Y puede que dicho vínculo nos guíe en el camino de compatibilizar los dos pilares de la física del siglo xx: la mecánica cuántica y la relatividad general. «El principio holográfico actúa como una señal de tráfico que nos dirige hacia la gravedad cuántica», explica Bousso. «Pero es posible que necesitemos otras señales.»



Y en medio de toda esta confusión aparece Hogan con su holómetro. Él carece de una gran teoría del todo, pero tampoco la necesita. Solo pretende entender un hecho fundamental: ¿se halla el universo compuesto de bits o no? Si consigue







Craig Hogan (*1*), director del Centro de Astrofísica de Partículas del Fermilab, hace una pausa en su despacho. Su equipo construye un experimento que enviará rayos láser a través de dos tubos de vacío de 40 metros de longitud (*2* y *3*). Los haces láser se enfocan y alinean con equipos ópticos de gran precisión (*4*).

MATT SIBER

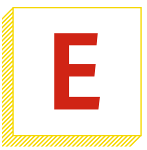
averiguarlo habrá encontrado una señal, una gran flecha que apuntaría en la dirección de un universo digital.

Según Hogan, en un mundo digital el espacio emerge a partir de bits cuantizados y discretos que viven en la escala de Planck. En tal caso, debería experimentar las incertidumbres inherentes a la mecánica cuántica. El espaciotiempo no permanecería en reposo, como si de un suave telón de fondo cósmico se tratase, sino que las fluctuaciones cuánticas provocarían que vibrase y se erizase: «En lugar de una especie de éter clásico, transparente y cristalino, a las escalas más diminutas el universo experimentaría pequeñas fluctuaciones, similares a las de una espuma», explica Nicholas B. Suntzeff, astrónomo de la Universidad Texas A&M. «Ello cambiaría por completo su textura.»

El reto consiste en escudriñar esa espuma y medirla. Y es aquí donde tropezamos con los problemas que plantea la longitud de Planck. El holómetro de Hogan intentará dar un rodeo para evitar un asalto frontal a dicha escala, una distancia tan ínfima que medirla con un acelerador de partículas requeriría construir una máquina casi tan grande como la Vía Láctea.

El interferómetro de Michelson y Morley se hallaba diseñado para detectar cambios minúsculos (en su caso, el cambio en la velocidad de la luz conforme la Tierra se movía alrededor del Sol) a partir de la comparación de dos haces de luz que recorrían distancias razonablemente largas: en efecto, la distancia debía multiplicar la intensidad de la posible señal. Lo mismo ocurre con el holómetro de Hogan. Su estrategia para descender hasta la longitud de Planck se basa en medir los errores que se acumulan cuando se trabaja con cualquier sistema cuántico y sus fluctuaciones.

«Si miro mi televisor o el monitor del ordenador, todo parece bonito y suave. Pero, si lo observamos desde muy cerca, podemos ver los píxeles», explica Chou. Algo así sucedería con el espaciotiempo. A la escala de las personas, los edificios y los microscopios, el espacio presenta un aspecto suave y continuo. Cuando un vehículo se desplaza por la calle, no vemos que salte de un lugar a otro, como si estuviese iluminado por luz estroboscópica. En un mundo holográfico, en cambio, sí deberíamos observar algo así, ya que el espacio emergería a partir de un sistema más profundo, de naturaleza cuántica. «Es hacer una pequeña trampa, ya que no dispongo de ninguna teoría», admite Hogan. Pero solo se trata de un primer paso: «Después, podré decirles a los teóricos de la gravitación que averigüen ellos cómo funciona».


El interferómetro de Michelson y Morley se habría parecido mucho al holómetro de Hogan si ellos hubieran tenido acceso a la microelectrónica y a láseres de dos vatios. Primero, la luz de un láser incide sobre un divisor de rayos que la separa en dos haces. Estos recorren después sendos brazos de 40 metros de largo y dispuestos en forma de «L». Al llegar al extremo, se reflejan en un espejo y regresan al divisor de rayos, donde se recombinan. Pero, en lugar de medir el movimiento de la Tierra a través del éter, Hogan intentará detectar el cambio en la longitud de los caminos provocado por el zarandeo que el espacio debería inducir en el divisor de rayos. Si a la escala de Planck el espaciotiempo se agita como un mar revuelto, el divisor de rayos vendría a ser como un bote que surca la espuma. En el tiempo que tardan los rayos láser en ir y volver, el divisor de rayos debería experimentar las suficientes sacudidas del orden de la longitud de Planck como para detectar dicho vaivén.

Por supuesto, existen otras muchas razones por las que el divisor de rayos podría desplazarse unas pocas longitudes de Planck: por ejemplo, el motor de un coche situado fuera del laboratorio o las sacudidas del edificio provocadas por el viento de Illinois. Estas mismas preocupaciones han aquejado a los encargados de otro proyecto de interferometría, el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), que cuenta con dos detectores gemelos situados en Livingston (Luisiana) y Hanford (Washington). El experimento fue diseñado para observar ondas gravitacionales, las «arrugas» del espaciotiempo que se originan tras grandes cataclismos cósmicos, como colisiones entre estrellas de neutrones. Por desgracia, las ondas gravitacionales agitan el suelo con la misma frecuencia con la que lo hacen otras causas no tan interesantes, como el paso de camiones o árboles que caen. Por tanto, los detectores deben aislarse al máximo del ruido y las vibraciones. El proyecto de un parque eólico en las cercanías de la planta de Hanford causó una gran consternación entre los responsables de LIGO, pues las meras vibraciones de las hélices habrían inundado los detectores de ruido.

El temblor que Hogan persigue ocurre con una frecuencia mucho mayor: en torno a un millón de veces por segundo. Como tal, las posibles fuentes de interferencia son bien distintas: tan solo alguna emisora de radio cercana que radie en AM con la misma frecuencia. «Nada oscila a esa frecuencia», asegura Stephan Meyer, físico de la Universidad de Chicago que trabaja en el holómetro. «Si detectamos que aun así se mueve, lo tomaremos como una señal fiable de que el temblor es real.»

En el mundo de la física de partículas, las señales fiables resultan muy difíciles de encontrar. Según Hogan, su experimento recuerda al viejo estilo de hacer física, basado en observar y descubrir, sin prejuicios, cómo funciona la naturaleza. A modo de ilustración, le gusta contar una parábola sobre los orígenes de la relatividad y la mecánica cuántica. Einstein formuló la teoría de la relatividad general sentado en su despacho, a partir de primeros principios. No resolvió casi ningún problema experimental; de hecho, tuvieron que pasar varios años hasta que llegase la primera confirmación empírica de la teoría. La mecánica cuántica, sin embargo, les vino impuesta a los teóricos por los impactantes resultados de los experimentos. «Ningún teórico en su sano juicio habría inventado la mecánica cuántica sin verse forzado a ello por los datos experimentales», comenta Hogan. Sin embargo, eso no impidió que se convirtiese en la teoría más exitosa en la historia de la ciencia.

Durante decenios, los teóricos han estado construyendo bellas teorías, como la teoría de cuerdas. Sin embargo, nadie sabe a ciencia cierta cuándo ni cómo podrán verificarse experimentalmente. Hogan ve su holómetro como una manera de producir los datos desconcertantes que los teóricos del futuro habrán de explicar. «Las cosas han estado atascadas durante mucho tiempo. ¿Cómo las desatascas? A veces se consigue gracias a un experimento», concluye.

PARA SABER MÁS

The holographic principle. Raphael Bousso en *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, n.º 3, págs. 825-874, 2002. **arxiv.org/abs/hepth/0203101**

La información en el universo holográfico. Jacob D. Bekenstein en *Investigación y Ciencia*, n.º 325, págs. 36-43, octubre de 2003.

Interferometers as probes of Planckian quantum geometry. Craig J. Hogan, febrero de 2010. Aceptado para su publicación en *Physical Review D*. **arxiv.org/abs/1002.4880**

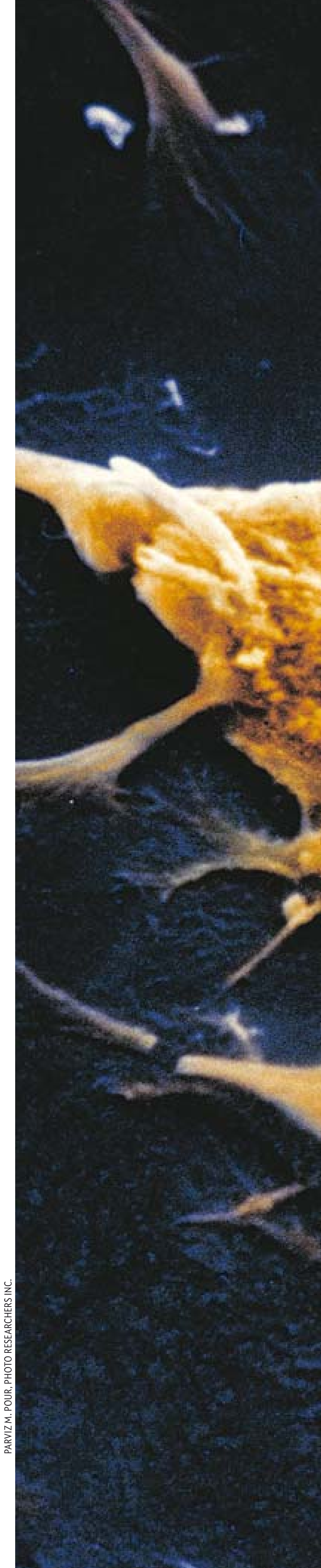
Now playing: Reality. In 3-D. T. Kunz en *Symmetry*, vol. 8, n.º 3, págs. 22-25, octubre de 2011.

MEDICINA

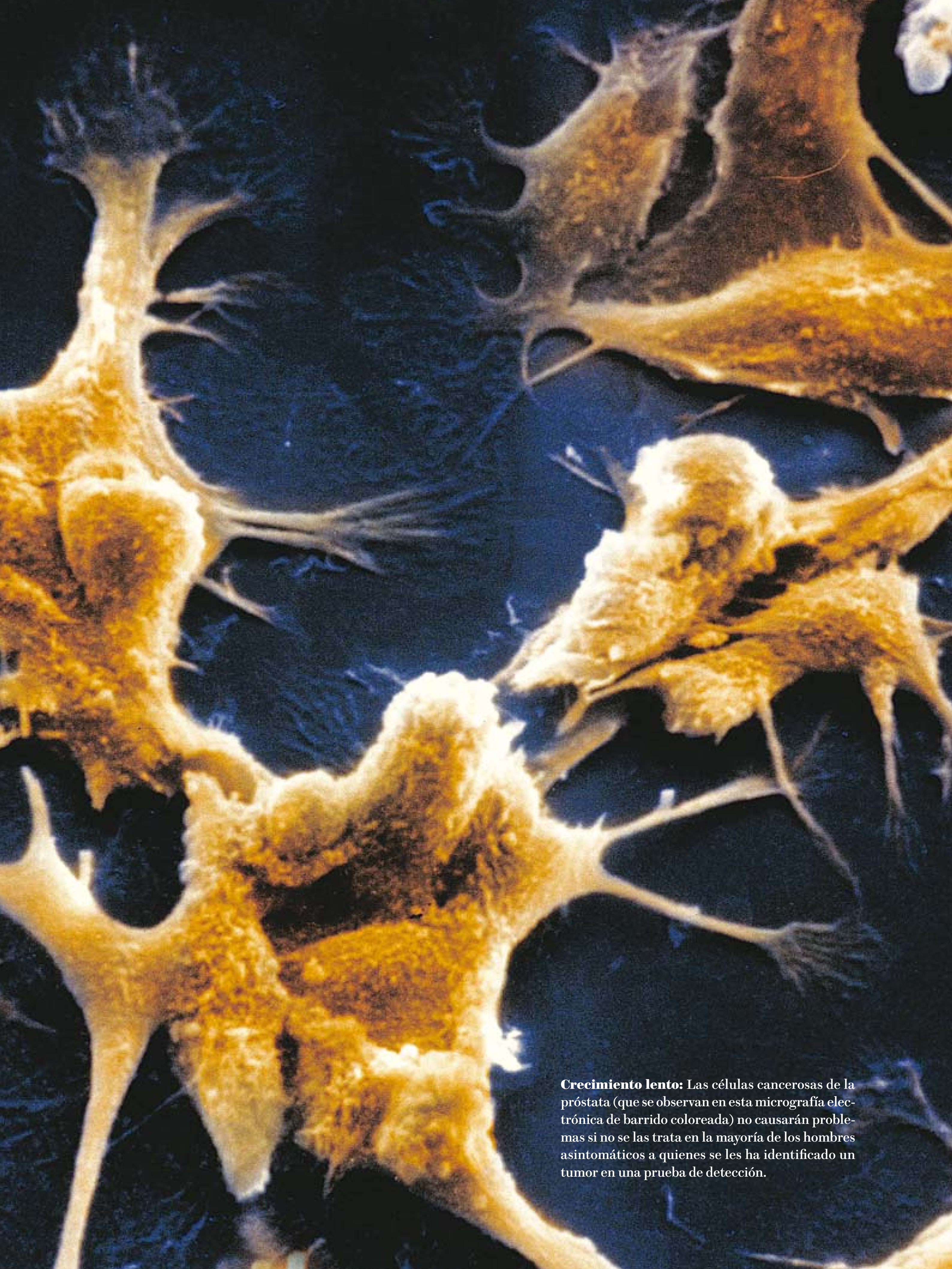
EL DEBATE DEL CÁNCER DE PRÓSTATA

La detección sistemática perjudica más de lo que beneficia porque conlleva la aplicación de tratamientos innecesarios

Marc B. Garnick



PARVIZ M. POUR, PHOTO RESEARCHERS INC.



Crecimiento lento: Las células cancerosas de la próstata (que se observan en esta micrografía electrónica de barrido coloreada) no causarán problemas si no se las trata en la mayoría de los hombres asintomáticos a quienes se les ha identificado un tumor en una prueba de detección.



Marc B. Garnick es médico e investigador experto en cáncer de próstata en la facultad de medicina de Harvard y en el Centro Médico Diaconisa Beth Israel de Boston, así como redactor jefe del informe anual de enfermedades prostáticas de la Universidad de Harvard.

El otoño pasado, el Grupo de Trabajo de los Servicios Preventivos de EE.UU. dejó caer una bomba al indicar que los hombres sanos deberían dejar de someterse a análisis de sangre sistemáticos para la detección del cáncer de próstata. Se argumentaba que los datos demostraban un escaso o nulo beneficio a largo plazo de la prueba del antígeno prostático específico (PSA, por sus siglas en inglés) en la mayoría de los hombres que carecían de síntomas de la enfermedad. La detección sistemática no estaba salvando vidas. En realidad, estaba exponiendo innecesariamente a centenares de miles de hombres que habían dado positivo a la prueba a complicaciones como impotencia, incontinencia urinaria (tras la eliminación quirúrgica de la próstata) y hemorragia rectal (a causa de la radioterapia). De hecho, el grupo de trabajo estimó que, debido a la prueba del PSA, desde 1985 se había tratado a más de un millón de hombres que de otro modo no se habrían sometido a ningún tratamiento. De ellos, al menos 5000 fallecieron poco después; otros 300.000 sufrieron impotencia, incontinencia o ambos trastornos. Pero en lugar de recibir elogios por intentar salvar a más hombres de un destino similar, el anuncio despertó la indignación y las réplicas de varios grupos de profesionales médicos, entre ellos la Asociación Americana de Urología.

La controversia no es nueva. Los expertos han debatido durante mucho tiempo acerca de la utilidad de la prueba del PSA, pero hasta ahora, el peso de la opinión en EE.UU. se inclinaba a favor de realizarla. Sin embargo, como oncólogo especializado en cáncer de próstata, estoy de acuerdo con la valoración que hizo el grupo de trabajo. La mayoría de las personas ajenas a la comunidad médica no se percatan de la escasa solidez de los datos a favor de la detección sistemática. (No obstante, hay que tener en cuenta que la prueba del PSA todavía proporciona una valiosa información después de que se haya diagnosticado un cáncer de próstata.) La población tampoco es consciente de la elevada frecuencia de las complicaciones, incluso de ciertos tratamientos que los defensores anuncian como los más avanzados.

Mientras continúa el debate sobre la prueba del PSA, la controversia se centra también en torno a otra pregunta: ¿resulta necesario tratar a los hombres que han dado positivo en la prueba? Y, en caso afirmativo, ¿cuándo conviene hacerlo? Aquí también, los datos apuntan a que se debería realizar un cambio de rumbo, en concreto, evitar un tratamiento agresivo temprano para todos y adoptar un enfoque más cauto y personalizado.

A raíz de esos cambios de actitud se está constatando que el cáncer de próstata evoluciona de modo muy distinto en cada paciente y que un tratamiento precoz no constituye la panacea que la mayoría de los médicos pensábamos que era.

EL ORIGEN DE LA CONTROVERSIA

La polémica surgió al descubrir las profundas deficiencias de la prueba de detección y los tratamientos. En un mundo perfecto, una prueba de detección identificaría solo los tumores letales. Los hombres a quienes se detectara un tumor reducido y curable podrían recibir tratamiento y salvarían sus vidas. De modo ideal, el tratamiento no solo debería mostrarse eficaz, sino también carecer de efectos secundarios graves. Tal suposición justificaría el examen colectivo a gran escala y el tratamiento de los individuos que dieran positivo.

Pero la realidad es muy diferente. La prueba del PSA no indica si un hombre padece cáncer; solo que podría padecerlo. Se mide la cantidad de antígeno prostático específico, una proteína que se produce en las células de la próstata y cuyos niveles pueden ascender por diversas razones, entre ellas, el crecimiento benigno de la próstata asociado a la edad, una infección, la actividad sexual o la proliferación de células malignas. Un resultado positivo significa que el paciente debe someterse a una biopsia, una intervención que implica cierto malestar y riesgo. La biopsia permite distinguir a los hombres que padecen cáncer de los que probablemente no lo sufrirán. El problema es que los médicos no disponen de un método fiable para confirmar cuáles de esos tumores de tamaño muy reducido identificados en la biopsia tal vez resulten peligrosos y cuáles no molestarán a un hombre en toda su vida. De hecho, los estudios de las autopsias demuestran que en EE.UU. más de la mitad de los hombres en su quinta década de vida, y tres cuartas partes de aquellos en su octava década, padecían cáncer de próstata, pero murieron por otro motivo. Debido a esta incertidumbre, los médicos desconocen quién necesita el tratamiento para sobrevivir y quién no.

Tal ambigüedad carecería de importancia si los tratamientos no presentaran riesgos. Sin duda, el esfuerzo y costo adicionales de tratar a todo el mundo para salvar a los pocos que realmente lo necesitasen merecerían la pena. Por desgracia, la prós-

EN SÍNTESIS

Los estudios demuestran que realizar análisis de sangre para detectar el cáncer de próstata no disminuye de modo significativo la mortalidad.

Cientos de miles de hombres probablemente hayan sufrido efectos secundarios graves como consecuencia de un tratamiento innecesario.

Sin embargo, muchos facultativos y sociedades médicas creen que la detección sistemática en la población salva vidas.

En la mayoría de los casos, realizar pruebas de detección pero aplazar el tratamiento representaría una solución intermedia eficaz.

tata se halla cerca del recto, la vejiga y el pene, lo que hace difícil su extirpación quirúrgica o la radioterapia sin causar complicaciones a largo plazo.

A cada tipo de tratamiento se le asocian ciertos efectos secundarios. La cirugía (prostatectomía radical abierta) suele dar lugar a pérdidas de orina, ya que la extirpación de la próstata exige desconectar la parte inferior de la vejiga del conducto urinario que atraviesa el pene. El cirujano conecta posteriormente la vejiga a la uretra, pero el daño al músculo cercano que controla la micción puede llevar a incontinencia. Además, durante la cirugía tal vez se corten nervios y vasos sanguíneos que controlan la erección, lo que ocasiona disfunción eréctil (impotencia). A pesar de que la publicidad ensalza la cirugía asistida por robot por conllevar menos complicaciones, no se han realizado grandes estudios independientes para comparar de forma rigurosa ambas técnicas.

Además de la impotencia, la radioterapia de la próstata suele acabar dañando el recto y la vejiga, ya que es difícil evitar la dispersión de la radiación, que llega a la parte frontal del recto y a la base de la vejiga. De hecho, la hemorragia rectal y el manchado fecal constituyen efectos secundarios frecuentes, no siempre informados, de la radioterapia (incluidos los implantes de semillas radiactivas) y las técnicas quirúrgicas. Además, entre los efectos adversos de los tratamientos contra el cáncer en estado avanzado (hormonoterapia, inmunoterapia o quimioterapia) se incluyen la inapetencia sexual, impotencia, aumento de peso, adelgazamiento de los huesos, sofocos y alteraciones cardíacas y hepáticas. Así pues, cuando se toma la decisión de ofrecer un tratamiento, se deben sopesar con cuidado los riesgos reales frente a los beneficios potenciales.

ACTUALIZACIÓN DE LOS PROTOCOLOS

Los indicios en contra de la detección sistemática del PSA han ido en aumento desde hace algún tiempo. En 2008, el Grupo de Trabajo de los Servicios Preventivos, en la última revisión de los protocolos del PSA, recomendaba no realizar la prueba a los hombres asintomáticos mayores de 75 años. Los datos demostraban que la mayoría de los que sufrían cáncer de próstata a esa edad solían morir por otra causa. Apenas un año más tarde, se publicaron dos grandes estudios prospectivos que también apuntaban en ese sentido en el caso de hombres más jóvenes.

Conocidos como el estudio europeo y el estudio estadounidense, respectivamente, los dos ensayos se realizaron sobre hombres sanos, la mayoría de ellos en su quinta y sexta década de vida, a quienes se separó al azar en dos grupos. A un grupo se le hizo un examen periódico para detectar cáncer de próstata con la prueba del PSA o tacto rectal (en el que el médico introduce un dedo en el recto para identificar alteraciones en la próstata), o ambas pruebas. Si cualquiera de ellas daba un resultado anómalo, se practicaba una biopsia, y si esta indicaba cáncer, se recomendaba el tratamiento. El segundo grupo no se sometió a las pruebas de rutina, sino que recibió la atención médica habitual en caso de necesidad. Por ejemplo, si empezaban a mostrar síntomas de cáncer de próstata, como dificultad para orinar (que es también un signo de hipertrofia prostática benigna), se les realizaban las pruebas. Al final de los períodos de estudio especificados, se evaluó a los pacientes a tenor de dos resultados importantes:

- ¿Vivieron más tiempo los hombres examinados sistemáticamente y tratados que aquellos que no lo fueron?
- ¿Disminuyó la mortalidad por cáncer de próstata en los hombres examinados sistemáticamente y tratados con respecto a los que no lo fueron?

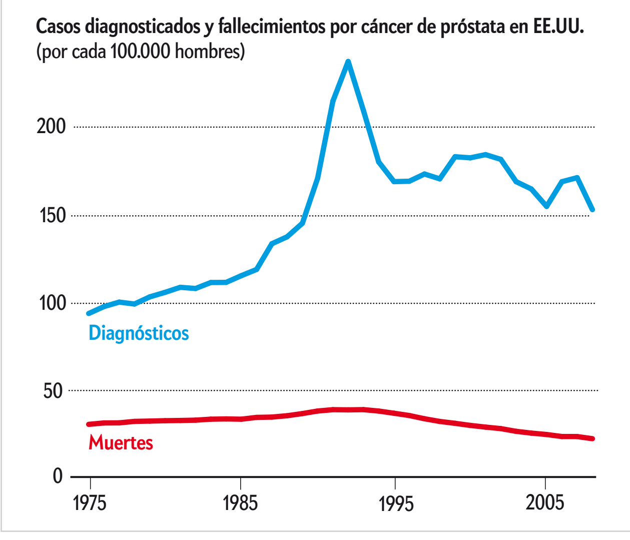
Cabe destacar que los participantes asignados al examen periódico y posterior tratamiento no vivieron más tiempo en ninguno de ambos estudios; en el europeo, presentaron una probabilidad un 20 por ciento inferior de morir por cáncer de próstata, disminución que no se observó en el estadounidense.

El estudio europeo prosiguió para calcular el número de hombres a los que se debería examinar y tratar para evitar una sola muerte por cáncer de próstata. La determinación de este índice, denominado número de personas que se necesitan supervisar (NNS), ha ido cobrando cada vez mayor importancia a la hora de identificar las pruebas de detección más útiles. Los investigadores europeos estimaron que para evitar una muerte por cáncer de próstata deberían realizarse las pruebas a unos 1400 hombres y tratar a 48 de ellos. Es decir, 47 hombres recibirían un tratamiento innecesario (muchos de los cuales sufrirían efectos secundarios graves) para que un hombre no falleciera por esa enfermedad. Sin embargo, a pesar de impedir una muerte por cáncer de próstata, la utilidad de las pruebas es discutible, incluso para esa única persona, ya que la mortalidad general por todas las causas resultó idéntica en ambos grupos (el que fue sometido al examen periódico y el que no). Análisis

ESTADÍSTICAS

Datos desalentadores

A partir de los años noventa del siglo XX, el uso generalizado de la prueba del PSA para detectar el cáncer de próstata conllevó un aumento de los casos diagnosticados (*azul*). Poco después, el número de muertes por cáncer de próstata (*rojo*) comenzó a caer. Pero estas tendencias no demuestran una relación de causa-efecto. De hecho, en 2009 dos estudios prospectivos revelaron que la prueba de detección del PSA no disminuye la mortalidad por cualquier causa, o apenas lo hace. El menor número de fallecimientos observado en la gráfica podría deberse a los cambios en el estilo de vida o tal vez al mayor uso de estatinas, fármacos para el colesterol cuyo efecto antinflamatorio podría proteger contra el cáncer.



NOTA: Datos ajustados para minimizar los efectos del envejecimiento general de la población de EE.UU. a lo largo del tiempo

SEER CANCER STATITSTICS REVIEW 1975-2008, POR EL INSTITUTO NACIONAL DEL CÁNCER DE EE.UU. (*datos*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfica*)

más recientes de los subgrupos en el estudio europeo han sugerido que el número de pacientes que se necesitaría tratar ascendería solo a 12. Sin embargo, los resultados más favorables proceden de una sola zona de Suecia, por lo que no se pueden aplicar de forma generalizada.

Como sucede siempre en los estudios médicos, hay que tener en cuenta algunas advertencias. Mientras que los datos indican claramente que la mayoría de los hombres sanos asintomáticos no deberían someterse a la detección sistemática, aquellos que poseen antecedentes familiares de cáncer de próstata (por ejemplo, hombres cuyo padre, tío o abuelo hayan fallecido por esa enfermedad antes de los 70 años de edad) pueden decidir realizarse la prueba del PSA. En términos prácticos, como médico, me sería difícil negarles ese análisis, especialmente si lo solicitan. Tal vez hayan heredado una predisposición genética a la enfermedad que, a diferencia de la población general, los hace más vulnerables a ella. Dentro de unos años puede que nos valgamos de pruebas genéticas específicas para identificar y vigilar más de cerca a los individuos de mayor riesgo.

LA DECISIÓN DEL SR. H.

Da la casualidad de que uno de mis pacientes, sin saberlo, se adelantó en 16 años a la posición del Grupo de Trabajo de los Servicios Preventivos, cuando él contaba 54 años de edad. En 1996, en contra del consejo de cada oncólogo al que consultó, decidió renunciar a cualquier tratamiento después de que una prueba de rutina del PSA indicase un diagnóstico de cáncer de próstata. La lectura de la bibliografía disponible lo llevó a concluir que su cáncer no iba a matarlo, por lo menos, en un futuro próximo. Además, razonó, el retraso podía resultar beneficioso si en los siguientes años aparecían nuevos tratamientos más eficaces. Por lo tanto, rechazó el tratamiento inmediato, aunque adoptó hábitos más saludables y adelgazó. Año tras año aconsejaba al Sr. H. (tal y como me referiré a él) que se sometiese al tratamiento, y año tras año, rechazaba con firmeza mi recomendación.

Dieciséis años después, el Sr. H. sigue todavía vivo y el tumor permanece confinado en su próstata. No se ha expuesto a cirugía, radioterapia o tratamientos farmacológicos contra el cáncer. Su nivel de PSA ha aumentado de 7 a 18 unidades, un incremento muy lento, lo que indica que el tumor está creciendo muy despacio. (Por supuesto, de haber conocido tal evolución, la decisión de no tratarle habría resultado más sencilla.) Al exigir información sobre las pruebas que se recomendaban por entonces, fue capaz de tomar una decisión razonada y evitó enfrentarse a daños casi seguros a cambio de obtener beneficios inciertos.

CAMBIO DE SUPUESTOS

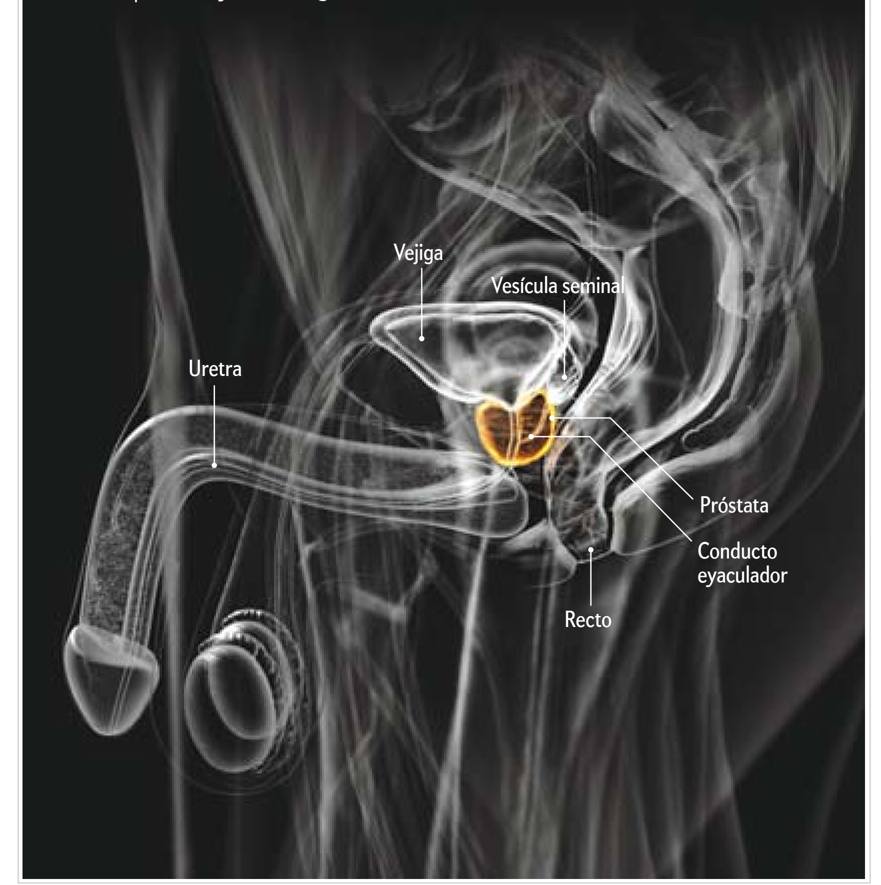
De hecho, cuando conocí al Sr. H., nuestras recomendaciones no se basaban en ensayos clínicos sólidos, sino en una idea errónea de cómo se comportaba el cáncer de próstata a lo largo del tiempo. Sabíamos que algunos de esos tumores presentaban un crecimiento lento y otros eran muy agresivos. Sin embargo, suponíamos que en la mayoría de los casos los tumores cancerosos pequeños terminaban por transformarse en otros de mayor tamaño, y estos a su vez se convertían en tumores metastásicos que se extendían por todo el cuerpo y se volvían incurables. Por tanto, detectar un cáncer en sus primeras etapas y extirparlo o destruirlo en ese momento significaría casi siempre salvar una vida. Esa suposición, en apariencia lógica, nos llevó a aconsejar a nuestros pacientes que se sometiesen a un tratamiento siempre que el cáncer se diagnosticara en sus fases iniciales. De hecho, esta misma estrategia se aplica en todos nuestros programas de detección de cáncer.

Por desgracia, los datos de mortalidad que se han recopilado durante los últimos 25 años demuestran que la his-

ANATOMÍA DEL RIESGO

Posibles complicaciones

El tratamiento del cáncer de próstata consiste en la extirpación quirúrgica de la próstata o la radioterapia. Sin embargo, la ubicación concreta de la glándula (que produce una parte del líquido seminal), determina que ambos métodos acarreen a menudo efectos secundarios. Debido a que la próstata se sitúa debajo de la vejiga, delante del recto y cerca de los nervios que intervienen en la erección del pene, la radioterapia y la cirugía pueden dar lugar a complicaciones como incontinencia urinaria, impotencia y hemorragia rectal.



BRYAN CHRISTIE

toria natural del cáncer de próstata no es tan sencilla como creíamos. Es cierto que la tasa de mortalidad por cáncer de próstata ha caído desde su valor máximo, en el decenio de los noventa. Si bien los defensores de la detección sistemática argumentan que tal disminución debe estar relacionada con la prueba del PSA, su conclusión no se apoya en estudios prospectivos, según hemos corroborado. Además, si nuestro conocimiento acerca del crecimiento y evolución del cáncer de próstata hubiese estado en lo cierto, el descenso de la mortalidad habría resultado más pronunciado y más rápido. De hecho, ahora sabemos que muchos tumores de próstata no progresan en absoluto. Su crecimiento es extremadamente lento o se halla estancado.

A medida que se descubren más ejemplos de tumores que se diagnostican por sus alteraciones celulares, pero que crecen tan despacio que ni se extienden ni se convierten en mortales, se habla de darles otra denominación, como tumor inactivo o de escasa malignidad. Se subraya así el hecho de que no es necesario tratarlos durante un largo período de tiempo, o quizá nunca. Desde luego, en un primer diagnóstico se desconoce si un tumor es inactivo, pero podemos realizar suposiciones sólidas, en función de sus características, que podremos confirmar mediante el seguimiento de los pacientes.

La decisión inicial de renunciar al tratamiento no tiene por qué ser definitiva. Se puede recurrir más adelante a otros tratamientos, y ello no afectará la evolución de la enfermedad

CAMBIO DE PRÁCTICA

Modificar los hábitos arraigados resulta tan difícil en medicina como en otras áreas de la vida. No faltarán pacientes (por no hablar de sus médicos) a quienes les cueste renunciar a una prueba de PSA después de tantos años de recomendar lo contrario. Y algunas personas jurarán que la prueba del PSA les salvó la vida. Afortunadamente, creo que podemos prestarles atención médica sin tener que someterlos a tratamientos innecesarios. Este enfoque ofrece también una solución al dilema de «tratar o no tratar». Consiste en retrasar el tratamiento hasta que se determine si el cáncer es inactivo, de crecimiento lento o potencialmente mortal.

En mi consulta, un porcentaje considerable de los hombres con cáncer de próstata a los que atiendo no están recibiendo ningún tratamiento en estos momentos. En vez de ello, están inscritos en un programa que solíamos denominar «espera vigilante», que ahora es más complejo y se conoce como «vigilancia activa con intención de tratar más tarde». En otras palabras, esos hombres han escogido someterse a la prueba del PSA y saben que presentan un tumor, pero han decidido que no se les trate de inmediato. En su lugar, se les controlan los niveles de PSA y se les realizan biopsias periódicas de la próstata para supervisar la actividad del tumor. El pasado mes de diciembre, un grupo de expertos convocado por los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU. examinó la información disponible y declaró que la vigilancia activa se había convertido en una opción viable que debe ofrecerse a los pacientes con cáncer de próstata de bajo riesgo.

El tratamiento se recomienda cuando las sucesivas biopsias revelan que el tumor está creciendo, los valores de PSA han aumentado en poco tiempo o las células de la última biopsia presentan un aspecto peligroso al microscopio (lo que se determina mediante la puntuación Gleason). Los resultados de un estudio a largo plazo realizado en Canadá indican que la mortalidad a causa de la enfermedad en hombres que eligen la vigilancia activa es del 1 por ciento en 10 años. En comparación, existe un riesgo del 0,5 por ciento de fallecer debido a complicaciones durante el primer mes después de la cirugía de cáncer de próstata.

Hay que subrayar que la decisión inicial de renunciar al tratamiento no tiene por qué ser definitiva. Cabe la posibilidad de recurrir más adelante a la cirugía, la radioterapia y otros tratamientos, y los datos indican que el resultado no se verá afectado negativamente por la demora. Aquellos que al final necesiten tratamiento podrían beneficiarse de las nuevas técnicas (mastectomía parcial de próstata o terapia focal) que destruyen solo la parte cancerosa de la próstata, con menos efectos secundarios (aunque los estudios comparativos sobre ese aspecto aún no han concluido).

Para el 4 por ciento de los estadounidenses con cáncer de próstata cuya enfermedad se ha propagado a los huesos u otros órganos aún no hay cura, pero, poco a poco, se descubren tratamientos más eficaces. Los inhibidores de la testosterona, que frenan el crecimiento del tumor, constituyen el tratamiento de referencia para los casos avanzados. Pero, en última instancia, unas cuantas células tumorales superan los efectos de esa restricción y siguen causando estragos. Recientemente, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. ha aprobado dos nuevas estrategias para tratar la enfermedad en estado avanzado. La primera consiste en un proceso bioquímico complejo que aumenta la capacidad del sistema inmunitario para destruir las células malignas [*véase* «Vacunas contra el cáncer», de Eric von Hofe; Investigación y Ciencia, diciembre de 2011].

La segunda es un medicamento, la abiraterona, que detiene la producción de testosterona en las células cancerosas de la próstata. Los estudios sobre ambos tratamientos demuestran que aumentan la supervivencia un promedio de cuatro meses. Otros tratamientos, dirigidos a las moléculas que las células cancerosas necesitan para crecer y propagarse, se encuentran en fase de investigación.

Hemos aprendido mucho sobre el cáncer de próstata desde que el Sr. H. decidió no tratarse lo que terminó siendo un tumor de crecimiento muy lento. Ese conocimiento está mejorando nuestra capacidad de personalizar los tratamientos, en lugar de aplicarlos a todos por igual. También nos ha enseñado a los médicos que debemos ser muy claros, con nosotros mismos y con nuestros pacientes, sobre lo que sabemos y sobre lo que no sabemos desde un punto de vista científico, y tener el coraje de actuar sobre la base de los datos disponibles, no de nuestras creencias.

PARA SABER MÁS

Screening for prostate cancer: A review of the evidence for the U.S. Preventive Services Task Force. Roger Chou et al. en *Annals of Internal Medicine*, vol. 155, n.º 11, págs. 762-771, 6 de diciembre de 2011. **www.annals.org/content/155/11/762**

2012 annual report on prostate diseases. Dirigido por Marc B. Garnick y Ann MacDonald. Harvard Health Publications, 2012. **www.harvardprostateknowledge.org**

Respuesta de la Asociación Americana de Urología al proyecto de recomendaciones del Grupo de Trabajo de los Servicios Preventivos de EE.UU., de 2011, sobre las pruebas del cáncer de próstata: **bit.ly/aua-letter**



Arrastrada por el viento, una pluma de polvo sahariano se extiende hacia el oeste en dirección a las islas Canarias.

MEDIOAMBIENTE

DE ÁFRICA AL AMAZONAS

Las revelaciones del viaje de un puñado de polvo sobre nuestro frágil planeta

Jeffrey Bartholet

La depresión del Bodelé, en el extremo meridional del Sáhara, es un lugar desolado y temible. Los vientos soplan con fuerza a través del macizo de Tibesti y la meseta de Ennedi, en Chad, donde se canalizan y aceleran hasta desembocar en una región yerma y seca del tamaño de California. Allí existió una vez un extenso lago de agua dulce que hoy ha quedado reducido a un charco menguante. En gran parte del terreno no hay absolutamente nada.

O así lo parece. Pero cuando los vientos barren los sedimentos del lago, que en su mayor parte no se ha inundado durante miles de años, levantan hacia el cielo millones de partículas diminutas. En ese momento el polvo emprende un viaje misterioso que los científicos tratan de descifrar.

Hasta hace pocas décadas los investigadores no mostraban un especial interés por ese material. Como todo el mundo, se limitaban a pasar el plumero por los muebles y a retirar las pelusas que rondaban por la casa (aglomeraciones de partículas que suelen contener fragmentos de insectos, fibras vegetales y migas de la cocina). A los que estudiaban la atmósfera terrestre les interesaba mucho más el material antropogénico, es decir, la contaminación. Pocos se tomaban la molestia de observar los millones de toneladas de polvo edáfico y mineral que circulaban sin cesar por el planeta e influían en el clima, fertilizaban los océanos y aportaban nutrientes vitales a la selva amazónica y otras regiones.

Joseph M. Prospero fue uno de los pioneros. Profesor emérito en química marina y atmosférica de la Universidad de Miami, se le ha considerado el precursor de los estudios sobre el polvo en Estados Unidos. Todavía recuerda que cuando publicaba artículos en los años sesenta y setenta que indicaban la existencia de un transporte a gran escala desde África hasta América a través del océano Atlántico, algunos de sus colaboradores se mostraban escépticos respecto a la relevancia científica del fenómeno.

CORTESÍA DE JACQUES DESCLOITRES, RAPIDFIRE.SCI.GSFC.NASA.GOV/MODIS LAND RAPID RESPONSE TEAM, NASA GSFC



Jeffrey Bartholet es corresponsal internacional y antiguo director de la revista *Newsweek* en Washington.

Mediante un trabajo solitario, supervisaba las estaciones detectoras de polvo ubicadas en Barbados y otras áreas impolutas y analizaba más tarde el material recogido en los filtros. Con el tiempo, el interés por el tema fue creciendo, en parte porque las imágenes de satélite evidenciaban el fenómeno que Prospero y otros describían: de modo parecido al aerosol marino de una tormenta gigantesca, el viento arrastraba desde el continente africano descomunales plumas de partículas, de centenares de kilómetros de anchura, que se depositaban más tarde al otro lado del Atlántico. Simultáneamente, el interés por el cambio climático experimentó un auge y se puso de manifiesto el papel fundamental del polvo en las variaciones de la temperatura terrestre.

«Hoy en día se publica tal cantidad de artículos científicos sobre el tema que resulta imposible leerlos todos», afirma Prospero. Desde el inicio de la década de los setenta hasta 2001 el número de publicaciones sobre el polvo sahariano se dobló cada cuatro años. Thomas E. Gill, profesor de ciencias geológicas en la Universidad de Texas en El Paso y encargado de mantener una base de datos sobre el polvo, reconoce su dificultad para ponerse al día. «Uno piensa que se trata de una cuestión esotérica, pero cada semana descubro entre 50 y 100 publicaciones nuevas de distinto tipo y formato.»

¿Qué revelan todas esas investigaciones? En esencia, el estudio de las partículas de polvo constituye un ejemplo del reto que supone intentar comprender los procesos que tienen lugar en nuestro planeta. Demuestra que intervenir en una región del ecosistema terrestre puede acarrear consecuencias importantes en otras áreas. «Cuantas más respuestas nos ofrecen los avances científicos, más preguntas nuevas nos planteamos», manifiesta Robert J. Swap, profesor de ciencias ambientales en la Universidad de Virginia. Coautor de un artículo fundamental de 1992 sobre el polvo africano en el Amazonas, Swap afirma que el estudio del polvo nos aboca a una sola conclusión: «La complejidad de la naturaleza merece un homenaje».

UN LARGO VIAJE

Un modo de desentrañar esa complejidad consiste en realizar el seguimiento de un hipotético puñado de partículas saharianas a través del Atlántico. A lo largo de su periplo y sus escalas consecutivas (no existe un destino final) puede analizarse la interacción del polvo con el entorno.

Comenzamos con la región del Bodelé, el lugar más polvoriento del planeta. También aportan material toda la extensión del Sáhara y la cercana región de Sahel. Las partículas africanas son transportadas cada verano hasta gran parte del sur y el este de Estados Unidos y representan entre un 75 y 80 por ciento del polvo que se deposita en Florida. Cuando llueve en Miami y los habitantes de la cuidad retiran de sus vehículos un residuo de partículas rojizas, se deshacen de un material procedente de África. Pasear por las islas Bahamas o por los Cayos de Florida es como hacer una excursión por suelo africano.

Se estima que el planeta emite anualmente dos mil millones de toneladas de polvo. Más de la mitad proviene de los desiertos y las regiones áridas africanas. China produce polvo que viaja hasta Hawai y el oeste de Norteamérica. Patagonia envía partículas hacia la Antártida. La mayoría de las que se depositan en Groenlandia proceden de Asia, aunque el material levantado durante la Gran Sequía (*Dust Bowl*) de EE.UU., en la década de los treinta, también pareció alcanzar los glaciares groenlandeses.

La mayor parte del polvo atmosférico de origen africano realiza un viaje de 6400 kilómetros a través del Atlántico, transportado por los alisios del este. Según las estimaciones, en la selva amazónica se posan cada año cerca de 40 millones de toneladas de polvo que contiene minerales esenciales para la vida, como hierro o fósforo. La mitad de ese material podría proceder del Bodelé.

Antes de emprender el viaje, el polvo del Bodelé ha permanecido en una sala de espera geológica. Cuando una capa es barrida, la siguiente queda expuesta. La velocidad del viento necesaria para desplazar las partículas minerales por la superficie y hacer que comiencen a rebotar varía según las características superficiales y climáticas, aunque el umbral suele situarse entre 4 y 12 metros por segundo. Cuando las motas comienzan a colisionar, hacen que otras se desprendan. Las más finas pueden flotar y elevarse. Una vez en el aire, comienzan a entremezclarse. Primero se reúnen con otras partículas del Bodelé y más tarde con las que se originan del suelo y la contaminación en otras regiones africanas. Finalmente, se incorporan al enorme frente de polvo que cruza el Atlántico.

Cuando me entrevisté con Prospero en su despacho de la Universidad de Miami, me enseñó algunas imágenes de satélite en su ordenador para mostrarme el fenómeno. «Es un caos», decía mientras señalaba plumas de diferentes colores y procedencias sobre África y el Atlántico. «Resulta difícil saber, en términos cuantitativos, lo que sucede en un lugar concreto. Todo queda mezclado. El viento barre sin cesar el norte de África.»

Una vez en el aire, el mismo polvo que ha permanecido inactivo durante milenios comienza a modular el clima terrestre. Absorbe la radiación solar, incluida la fracción reflejada por la superficie terrestre, de modo que la atmósfera se calienta. Asimismo, refleja otras radiaciones hacia el espacio, con el consiguiente efecto de enfriamiento. La proporción de radiación absorbida o reflejada depende, a su vez, de la composición química, la mineralogía y el tamaño de las partículas, así como de la longitud de onda de la radiación. En su mayor parte, el polvo tiende a reflejar radiaciones de longitud de onda corta procedentes del espacio y a absorber las de onda larga procedentes de la superficie terrestre. Si las partículas se mezclan con hollín, absorben todavía más calor.

EN SÍNTESIS

Aunque existen numerosos estudios sobre la contaminación, durante muchos años se pasó por alto la interacción entre los aerosoles naturales constituidos por polvo y la atmósfera. En tiempo reciente se ha comenzado a investigar la manera en que el polvo influye sobre el clima y la formación de nubes, así como en la fertilización de océanos y selvas tropicales.

A pesar del gran número de investigaciones, los efectos del polvo en la atmósfera son complejos y no se conocen en profundidad. Incluso los mejores superordenadores que ejecutan los modelos más refinados no logran proporcionar una visión general satisfactoria.





Hielo sucio: Miembros del equipo de Joseph R. McConnell toman muestras de hielo en Groenlandia (*arriba*) para analizarlas después en el laboratorio. El hielo contiene partículas que se acumulan en la nieve durante siglos (*derecha*). El objetivo es comprender las causas de las variaciones en los niveles de polvo.

CORTESÍA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN SOBRE EL DESIERTO

POLVO Y CLIMA

Pero también entran en juego otros factores. Las partículas que sobrevuelan las regiones oscuras, como los océanos, enfrían el planeta porque reflejan una radiación que de otro modo sería absorbida por la superficie del mar. Por el contrario, el polvo que atraviesa las regiones de color claro, en las que abunda el hielo o la arena, tiende a producir un efecto de calentamiento, ya que absorbe más cantidad de radiación que la superficie subyacente. Si el polvo se deposita sobre la nieve o el hielo, el calentamiento se acentúa aún más. «Cualquier aerosol, polvo o partícula de suciedad oscurece la nieve», afirma Charlie Zender, profesor de geología en la Universidad de California en Irvine. «Si caminas por un campo de nieve por la mañana y colocas un poco de tierra sobre un trozo de nieve y la dejas ahí, cuando regreses al mediodía comprobarás que esa parte de la nieve se halla más hundida.» Algunos de los científicos que entrevisté consideran que en conjunto el polvo atmosférico provoca un enfriamiento del planeta, aunque no lo bastante intenso como para compensar el calentamiento producido por los gases de efecto invernadero.

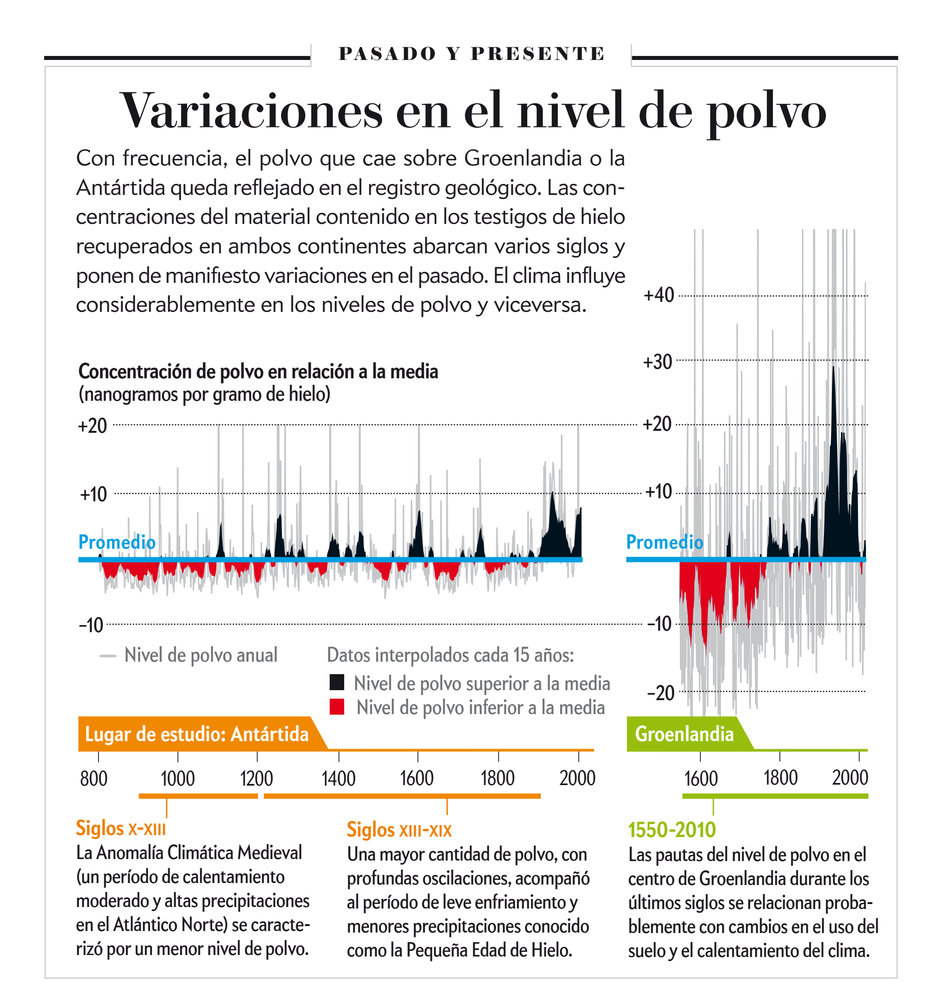
Por otro lado, la presencia de polvo en la atmósfera influye de modo indirecto en el clima. Constituye un factor decisivo en el proceso de formación de nubes. La humedad del aire, por sí misma, no origina gotas. Necesita adherirse a partículas. Se debate sobre si el polvo puede actuar como núcleo de condensación. Natalie Mahowald, de la Universidad Cornell, desarrolla modelos atmosféricos y sostiene que tanto el agua como el hielo condensan sobre las partículas de polvo. Paul Ginoux, que realiza modelos climáticos en el Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de EE.UU. (NOAA), respalda la idea de que el polvo actúe como agente condensador para el hielo, pero considera que el agua condensa solo sobre polvo mezclado con sulfatos, derivados principalmente de la polución.

Mahowald y Ginoux coinciden al menos en un aspecto: existen grandes lagunas en nuestro conocimiento sobre la formación de las nubes. En un determinado momento, la atmósfera contiene en suspensión un número elevado de partículas diminutas que facilitan la creación de grandes masas de gotas de agua pero, debido a su reducido tamaño, tienen menos posibilidades de caer en forma de lluvia. Además, las nubes de gotas pequeñas son más brillantes que las que contienen gotas más grandes y, por tanto, reflejan más radiación hacia el espacio. Sin embargo, si las partículas de polvo absorben calor, la humedad que atraen se evaporará con mayor rapidez. Las nubes no durarán mucho tiempo. El polvo hace que las precipitaciones sean más o menos probables según el comportamiento del resto de la atmósfera. Resulta más complicado de lo que se podría pensar. Ni siquiera las mejores simulaciones por ordenador nos ofrecen una visión completa del fenómeno. «Conocemos los procesos físicos pero es difícil evaluar con precisión lo que sucede», señala Ginoux.

Pocas veces se sobrevalora la importancia de las nubes para el clima, y no solo porque generen lluvia o nieve. En todo momento, cerca del 60 por ciento de la superficie terrestre está cubierta por nubes. Pequeñas variaciones en la formación y las propiedades de las nubes podrían alterar de forma drástica el modo en que reflejan luz y calor hacia el espacio. Las estimaciones indican que si se incrementara en un 5 por ciento el forzamiento de las nubes sobre la radiación de onda corta (la radiación solar reflejada por las nubes hacia el espacio), la Tierra se enfriaría lo suficiente como para compensar todo el aumento en gases de efecto invernadero ocurrido entre 1750 y 2000.

Evidentemente, el polvo se ha estado arremolinando por el planeta a lo largo de toda su existencia. Por tanto, ¿por qué debería presentar en la actualidad mayores o menores consecuencias que antes? Mahowald argumenta que hoy existe en el mundo una mayor cantidad de polvo en movimiento que en otros momentos de la historia reciente. Todo indica que durante el siglo XX se duplicó la cantidad de polvo en gran parte del planeta. No se conocen exactamente las causas de ese incremento, pero la actividad humana podría haber acelerado el cambio.

Joseph R. McConnell, del Instituto de Investigación sobre el Desierto, en Reno (Nevada), se dedica precisamente a estudiar las causas y los efectos. Con ese objetivo, analiza el polvo intercalado en las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida. Para ello, obtiene en primer lugar testigos de hielo en distintos puntos. Los testigos alcanzan desde 20 metros hasta 3 kilómetros de longitud en función de la edad de muestreo que le interesa. A continuación los envía a su laboratorio. Allí cuenta con dos espectrómetros de masas de alta resolución con los que determina la composición del hielo. Analiza la concentración de aluminio y algunas tierras raras como el cerio, que se hallan presentes en el polvo pero no en el agua marina, la contaminación industrial o las emisiones procedentes de volcanes e incendios forestales.



JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*); FUENTES: JOSEPH R. MCCONNELL, INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN SOBRE EL DESIERTO; ZOE COURVILLE, LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN DE LAS REGIONES FRÍAS Y EL EQUIPO INVESTIGADOR DE LA TRAVESÍA CIENTÍFICA NORUEGO-AMERICANA POR LA ANTÁRTIDA ORIENTAL

Los aparatos funcionan del siguiente modo: el agua glacial de los testigos se inyecta en un plasma calentado a la temperatura de la superficie del Sol (unos 6000 kelvin). «En esas condiciones se evapora casi todo, tras lo cual contamos los átomos ionizados de los elementos que quedan basándonos en su masa atómica y su carga eléctrica», explica McConnell. «Se trata de aparatos extraordinariamente sensibles. Algunas concentraciones elementales son tan bajas que alcanzan la proporción de $1:10^{15}$. Hemos aplicado la técnica a los testigos de hielo superficial, correspondiente a los últimos siglos, y solo ahora la hemos comenzado a emplear en los de hielo profundo, que abarcan la última glaciación.»

McConnell tiene la intención de medir los niveles de polvo a lo largo del tiempo para averiguar las causas de sus aumentos y disminuciones. Los resultados apuntan que la desertificación y los cambios en el uso del suelo en Patagonia (incluida la expansión de la ganadería ovina a comienzos del siglo xx) se asocian a una cantidad doble de polvo en la Antártida durante ese mismo período. Parecería tentador argumentar una única relación de causa y efecto: el uso excesivo de la tierra conduce a la desertificación, lo que conlleva una mayor producción de polvo y a su vez intensifica el cambio climático. Sin embargo, McConnell advierte que existen numerosos factores que influyen en las partículas de polvo.

El clima en sí mismo constituye uno de esos factores, pero su papel no se ha comprendido del todo. El ascenso de las temperaturas, con la consiguiente reducción de la humedad del suelo y el aumento de la desertificación, favorecería la formación de polvo, aunque podría tratarse tan solo de un fenómeno a corto plazo. A largo plazo, los períodos en los que se ha registrado una mayor cantidad de polvo se corresponden con épocas frías. McConnell afirma que la Antártida era menos polvorienta entre los siglos x y xiii, un período de calentamiento moderado y altas precipitaciones en la región norte del Atlántico, y más polvorienta entre los siglos xiii y xix, época de leve enfriamiento y menores precipitaciones. Sus análisis del registro de hielo en el centro de Groenlandia revelan una tendencia al alza en los valores de polvo a lo largo de tres siglos hasta 1930, seguida de un decrecimiento inexplicable.

BIOQUÍMICA OCEÁNICA

No obstante, las hipotéticas partículas que vuelan y se arremolinan desde África (la parte más voluminosa y persistente del polvo que se desplaza sobre el planeta) no solo desempeñan una función crucial en la atmósfera. También actúan como un enorme aspersor de fertilizante sobre océanos y continentes.

En su travesía hacia el oeste, la mayoría de las partículas caen en el Atlántico. Allí también actúan como reguladores del clima, pero su función es muy distinta de la que ejercen cuando se hallan suspendidas en la atmósfera, aunque también provocan un enfriamiento: las partículas suministran hierro y con ello estimulan el crecimiento del fitoplancton, que consume dióxido de carbono y al morir arrastra consigo el carbono hacia las oscuras profundidades del fondo oceánico. En ese lugar el carbono permanece aislado de la atmósfera durante siglos.

El océano alberga casi el 85 por ciento del carbono terrestre que no forma parte de las rocas, y el fitoplancton ha contribuido a la mayor parte del secuestro de carbono a lo largo del tiempo geológico, según un artículo publicado en 2011 en la revista *Aeolian Research*. Pero si bien las extensas áreas oceánicas presentan elevadas concentraciones de nitrógeno y fósforo, también escasean en hierro, lo que limita el crecimiento del plancton. Y aquí es donde entra en juego el polvo atmosférico. El material procedente de África es rico en hierro. Hace pocos años, el descubrimiento de la importancia del hierro en el ciclo del carbono —y el papel indirecto del polvo— despertó tal interés que se empezó a soñar con ambiciosos proyectos de ingeniería geológica. Se pensaba en la posibilidad de introducir enormes cantidades de hierro en las vastas regiones de los océanos australes y el noroeste del Pacífico, ricas en nutrientes pero pobres en clorofila, donde los florecimientos de plancton escasean. De este modo el plancton proliferaría en gran medida, consumiría dióxido de carbono y, al morir, se hundiría en el fondo oceánico. Y terminarían así los problemas relacionados con los gases de efecto invernadero.

Sin embargo, pronto se evaluaron los riesgos de esta estrategia. Según Prospero, existen numerosas consecuencias imprevisibles. Podría producirse un cambio drástico en la distribución actual de las especies de microorganismos en la columna

de agua. El hecho no tiene por qué resultar perjudicial, pero sus efectos no se pueden predecir; con frecuencia, los nuevos ecosistemas no son tan diversos ni tan productivos como los ecosistemas a los que desplazan. Además, si el vertido de hierro se realiza en zonas pobres en ese elemento pero ricas en otros, las nuevas plumas de plancton no solo arrastrarán hacia el fondo oceánico dióxido de carbono, sino también fósforo y nitrógeno. En consecuencia, estos nutrientes no estarían disponibles en otras regiones oceánicas donde pudieran necesitarse.

Los nuevos hallazgos han socavado aún más la propuesta del vertido de hierro. «Nuestra manera de entender la bioquímica oceánica ha cambiado por completo», comenta Mahowald, de la Universidad Cornell. «Lo que pensábamos hace diez años no tiene nada que ver con el modo actual de entender los mismos procesos.» Una de las mayores revelaciones es que no todo el polvo puede liberar la misma cantidad de hierro. Al parecer, los ácidos contenidos en la atmósfera (resultantes de la combustión de biomasa y otras sustancias contaminantes) interaccionan con el polvo y hacen aumentar la solubilidad del hierro. De modo que cuando quemamos combustibles y residuos contribuimos a la producción de hierro disponible en la atmósfera y los océanos. La cantidad de hierro que se deposita en los océanos podría haberse duplicado a causa de la mano del hombre. Al mismo tiempo, la cantidad de hierro sedimentario en el océano es mucho mayor de lo que se estimaba. Una enorme cantidad del elemento procede de las plataformas continentales. Por tanto, la relevancia del hierro atmosférico es menor de lo que se pensaba.

Las partículas que cruzan el Atlántico tardan una semana o más en completar su travesía. En verano se observan con frecuencia nubes de polvo africano sobre Miami o finas capas de polvo sobre los vehículos tras una tormenta en el Amazonas. Así es como Swap comenzó a interesarse por el transporte de las partículas a finales de la década de los ochenta. Trabajaba en Brasil como estudiante de posgrado cuando él y otros compañeros se dieron cuenta de que tras varios días de lluvia, el polvo seguía acumulándose sobre sus Volkswagen blancos. «Nos encontrábamos a mil millas de la costa y llovía a cántaros, de 75 a 100 milímetros cada día», recuerda Swap. «Después de llover veíamos que una capa de polvo rojizo cubría nuestros coches. Así que nos preguntábamos: ¿qué pasa aquí?»

FORMACIÓN DE SUELOS

El fenómeno guardaba relación con otro que había degradado de forma considerable el Amazonas. La cuenca amazónica está compuesta por suelos antiguos sometidos a constantes lluvias que probablemente lixiviaron hace mucho tiempo la mayoría de los nutrientes esenciales. Por tanto, ¿cómo se regeneraron los suelos del Amazonas? ¿Por qué han mantenido la fertilidad? Muchos consideran que la descomposición de la materia orgánica vegetal permite la recuperación de los nutrientes. Otros consideran esa hipótesis improbable y tratan de averiguar, en primer lugar, el motivo de la elevada fertilidad. Daniel Muhs, científico del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU., plantea la hipótesis de que la riqueza de los suelos se debe en gran medida al polvo transportado desde África. «¿Qué otra razón puede explicar la increíble diversidad de especies animales y vegetales en un paisaje tan cálido, húmedo y antiguo, cuyos suelos están lixiviados?»

Las recientes investigaciones han confirmado la existencia de depósitos similares de polvo intercontinental en otras regiones. Muhs comparó las características geoquímicas de los suelos de varias islas del Caribe. Descubrió que en algunas zonas, el polvo africano constituía el único origen de los suelos; en otras, representaba una parte de ello. Algunas islas se componen de caliza, arrecifes de coral y arena, pero aun así las capas superficiales del suelo contienen abundantes arcillas y silicatos de aluminio de un origen distinto. Según Muhs, existen dos posibles fuentes de ese material: la ceniza procedente de las zonas volcánicas activas del Caribe o el polvo africano. Los suelos de algunas regiones, como Barbados, se componen de ambos tipos de partículas. Los de otras, como las Bahamas o los Cayos de Florida, proceden casi por completo de África. «Nuestros estudios en Barbados con arrecifes fósiles de diferentes edades indican que el transporte de polvo africano se ha venido produciendo a lo largo de cientos de miles de años», confirma Muhs.

¿Cuánto tiempo persistirá este proceso? A tal respecto, cabe mencionar la última cuestión relacionada con el desplazamiento del polvo: no solo las partículas influyen en el clima terrestre, sino que a su vez el clima ejerce un profundo efecto sobre ellas. «El polvo atmosférico se distingue de otros aerosoles en que, a diferencia de los contaminantes antropogénicos, se ve modificado por el propio clima», afirma Prospero. «Si el cambio climático llegara a alterar la velocidad del viento y las precipitaciones, las repercusiones serían enormes. El polvo se muestra muy sensible a pequeñas variaciones en los vientos y las lluvias. Es un gran círculo vicioso.»

Las pruebas de esa estrecha relación pueden observarse en testigos de hielo y otros registros. Los períodos glaciales fueron más polvorientos que los interglaciales. «Pero todavía estamos tratando de descifrar el acertijo de la gallina y el huevo», comenta Muhs. «¿Fueron las glaciaciones las causantes del polvo o fue el polvo el causante de las glaciaciones? Existe una amplia variedad de interacciones. En pocos pasos se complica todo el proceso.» Dicha complejidad hace que las soluciones propuestas ante el cambio climático resulten tan problemáticas y queden reducidas a meros sueños, como la idea del vertido de hierro. «Dados los numerosos procesos que interactúan con otros, y estos a su vez con otros, ¿qué nuevas repercusiones cabría esperar?», se pregunta Muhs. «Podríamos estar resolviendo un problema pero creando uno nuevo.»

Prospero ya ha empezado a detectar ciertos fenómenos extraños e inesperados. Durante las décadas de los setenta y los ochenta, las concentraciones de polvo en Barbados y Miami se correlacionaban estrechamente con sequías y precipitaciones en el norte de África: cuanto más intensa era la sequía, mayor era la concentración de polvo. Pero todo cambió a partir de 1990. A Prospero le preocupa y le confunde que en la actualidad no se aprecie ninguna relación y se desconozca el motivo. Teme que el polvo represente un nuevo indicador de que los complejos sistemas terrestres estén quedando fuera de control, de modo que los pronósticos resulten imposibles y el futuro cada vez más incierto.

PARA SABER MÁS

Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. Joseph M. Prospero et al. en *Reviews of Geophysics*, vol. 40, n.º 1, 4 de septiembre de 2002.

Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. Yaping Shao et al. en *Aeolian research*, vol. 2, n.º 4, págs. 181-204, marzo de 2011.

The dustiest place on Earth. Página web sobre el experimento de campo BodEx en la depresión del Bodelé: **www.rgs.org/OurWork/Grants/Grant+recipients/Example+projects/The+Dustiest+Place+of+Earth.htm**

Raúl Rabadán, doctor en física teórica, es codirector de la división de bioinformática y profesor en el departamento de informática biomédica del Centro de Biología Computacional y Bioinformática de la Universidad de Columbia en Nueva York. Investiga los patrones que rigen la evolución de los sistemas biológicos, con particular interés en los virus de ARN y el cáncer.



BIOLOGÍA COMPUTACIONAL

Evolución vírica en la era genómica

La secuenciación del genoma de decenas de miles de virus de la gripe está permitiendo el desarrollo de modelos matemáticos para describir sus redes de circulación mundial, sus patrones evolutivos y el origen de las pandemias

Raúl Rabadán

A principios de noviembre de 1918, un convoy con suministros llegó a Brevig Mission, un pequeño poblado de la península de Seward, en la costa oeste de Alaska. En cinco días, entre el 15 y el 20 de noviembre, 72 de los 80 habitantes de la aldea murieron a causa de la gripe española. La pandemia se estaba propagando por todos los rincones del planeta con un patrón de mortandad inusual para la gripe: más de la mitad de los fallecidos contaban entre 20 y 40 años de edad. El 3 de octubre de ese mismo año, la ciudad de Filadelfia había cerrado todas las escuelas, iglesias y teatros. Un día después, Nueva York había impuesto la regulación de los horarios de trabajo y comercio para evitar las aglomeraciones, así como medidas de cuarentena a los barcos que llegaban a la ciudad. Se estima que, entre 1918 y 1919, la pandemia se cobró más de 50 millones de víctimas mortales en todo el mundo.

Ayudados por buscadores de oro de la zona, los pocos supervivientes de Brevig Mission depositaron los cadáveres en una fosa común. El permafrost, el suelo helado que recubre parte de Alaska, preservó los cuerpos hasta que, en 1997, Johan Hultin, médico de la Universidad de Iowa, abrió la fosa y envió muestras de pulmón del cadáver de una joven inuit a Jeffery Taubenberger, patólogo molecular del Instituto de Patología de las Fuerzas Armadas de Washington. Taubenberger estaba intentando reconstruir el genoma del virus de la gripe española a partir de las muestras de soldados fallecidos a causa de la pandemia. Gracias a las que recibió desde Brevig Mission, logró completar el genoma del virus responsable de la primera pandemia del siglo xx [*véase* «El virus de la gripe de 1918», por J. K. Taubenberger, Ann H. Reid y Thomas G. Fanning; Investigación y Ciencia, marzo de 2005].

El virus de la pandemia de 1918 es el más antiguo de los aproximadamente 60.000 genomas de gripe que hoy se encuentran depositados en las bases de datos. Entre ellos se incluyen los de cuatro pandemias (1918, 1957, 1968 y 2009), así como los de una multitud de virus aislados en todos los continentes (ex-

Secuencias genéticas de la proteína de superficie hemaglutinina correspondientes a varias cepas de virus H1N1 (el código empleado denota con «T» los nucleótidos de uracilo).

EN SÍNTESIS

La gripe es una de las pocas enfermedades de carácter verdaderamente global. La elevada tasa de evolución del virus dificulta enormemente cualquier medida terapéutica.

Los miles de genomas del virus disponibles en las bases de datos están permitiendo construir modelos matemáticos para entender la evolución y propagación del patógeno.

Este nuevo enfoque ha permitido reconstruir las redes mundiales de virus. Estas se analizan con técnicas similares a las que se emplean en Internet o en el estudio de las redes sociales.

Los modelos probabilísticos permiten identificar los patrones de mutación del virus, reconstruir su historial de reagrupamientos genéticos y entender el origen de las pandemias.

CORTESÍA DEL AUTOR

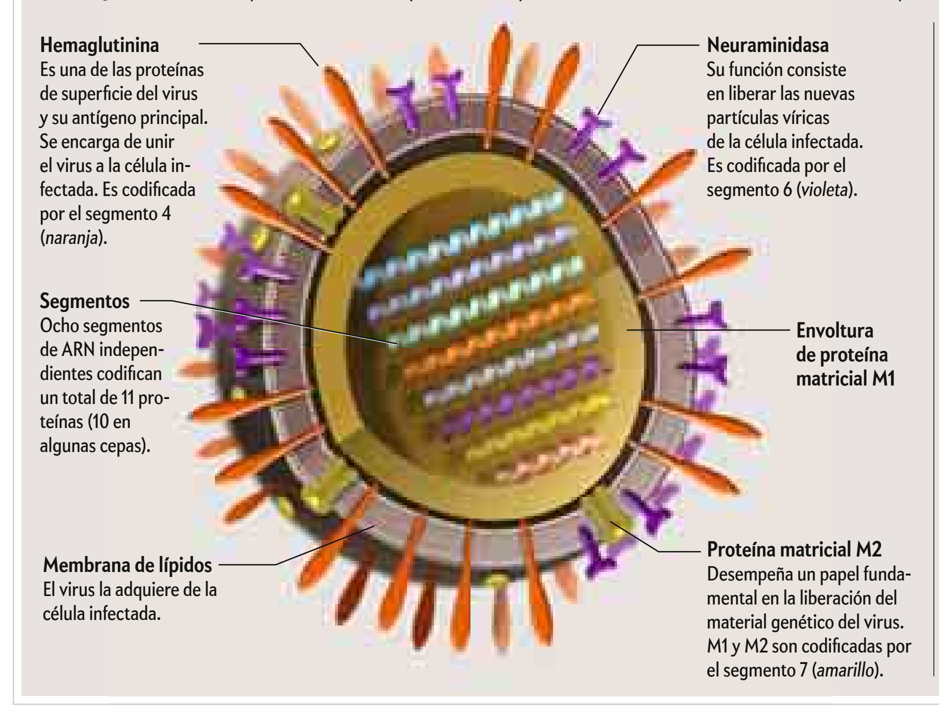


EL VIRUS DE LA GRIPE A

Estructura y evolución

El material genético de los virus de la gripe A consta de ARN de cadena simple, el cual viene empaquetado en ocho segmentos independientes que codifican un total de 11 proteínas (10 en algunas cepas). El mayor de los segmentos contiene unos 2400 nucleótidos; el menor, menos de 900. Los virus de la gripe A suelen clasificarse según el subtipo de proteína de superficie hemaglutinina (H, *naranja*), de la que existen 17 variedades (la última de ellas descubierta el pasado mes de enero en murciélagos), y neuraminidasa (N, *violeta*), que presenta 9 variedades.

La gripe puede infectar a múltiples huéspedes, como humanos, cerdos y aves. Los virus del tipo H1N1 y H3N2 son comunes en humanos. La gripe es una de las pocas enfermedades de carácter verdaderamente global: las epidemias estacionales causan cientos de miles de fallecimientos al año. El virus de la gripe se caracteriza por la enorme rapidez con la que evoluciona, lo cual lo convierte en un objetivo muy difícil de cualquier medida terapéutica. En promedio, cada 30 años sobreviene una pandemia.



Mutaciones

Al igual que otros virus de ARN, la replicación del virus de la gripe se ve afectada por un gran número de errores, lo cual induce una tasa evolutiva muy elevada. En solo un año, los cambios genéticos sufridos por el virus de la gripe resultan equiparables a los que experimenta nuestra especie durante un millón de años.

Reagrupamiento

Otro mecanismo que moldea la evolución de la gripe es el reagrupamiento: cuando dos virus coinfectan una misma célula, las nuevas partículas víricas pueden tomar algunos segmentos de un ancestro y otros del segundo. Este proceso de mezcla permite generar nuevas variedades con gran rapidez. Si dos virus coinfectan una célula, pueden producirse hasta 256 nuevas combinaciones. Hoy sabemos que los procesos de reagrupamiento fueron los responsables de al menos tres de las cuatro pandemias de gripe que se declararon durante el siglo XX.

cepto en la Antártida) y en una amplia variedad de huéspedes (humanos, cerdos, aves, caballos, tigres, focas, camellos ballenas, e incluso murciélagos). Durante los últimos años, esta enorme colección de datos ha permitido construir modelos matemáticos para estudiar los cambios en el genoma de estos virus. ¿Qué patrones rigen su evolución y su propagación por el planeta? ¿Cómo se combinan sus genomas para producir nuevas variantes? ¿Cuál es el origen de las pandemias?

El material genético del virus de la gripe consta de ARN de cadena simple. Como otros virus de ARN, el gran número de errores que ocurren durante su replicación induce una tasa evolutiva muy elevada. En solo un año, los cambios genéticos sufridos por el virus de la gripe resultan equiparables a los que experimenta nuestra especie durante un millón de años. Unos pocos años de evolución vírica equivalen a la diferencia que media entre un chimpancé y un humano. En apenas un siglo (el tiempo transcurrido entre la gripe española de 1918 y la pandemia de 2009) el genoma del patógeno se ha transformado en un 15 por ciento: una variación genética similar a la existente entre un ratón y un humano.

La alta tasa de evolución del virus de la gripe lo convierte en un objetivo extremadamente esquivo de cualquier medida terapéutica. Uno de los métodos más eficientes para combatir enfermedades infecciosas es la vacunación, la cual se basa en enseñar a nuestro sistema inmunitario adaptativo a reconocer patógenos. Sin embargo, la rápida evolución del virus de la gripe hace muy difícil predecir cuál de ellos constituirá el mejor candidato para diseñar la vacuna de cada temporada. A pesar de que un comité de la Organización Mundial de la Salud se reúne dos veces al año para decidir qué cepas se emplearán en la vacuna, su eficacia nunca puede garantizarse de antemano.

Cada 30 años, un nuevo virus de la gripe provoca una pandemia. La última tuvo lugar en 2009. Aunque el número de muertes entre los infectados fue inferior al de las otras pandemias del siglo pasado, su irrupción puso de manifiesto la falta de preparación de nuestra sociedad para reaccionar ante este tipo de acontecimientos. Entender los patrones de evolución y propagación del virus constituye, por tanto, un paso necesario para predecir mejor su comportamiento y diseñar medidas sanitarias más eficaces.

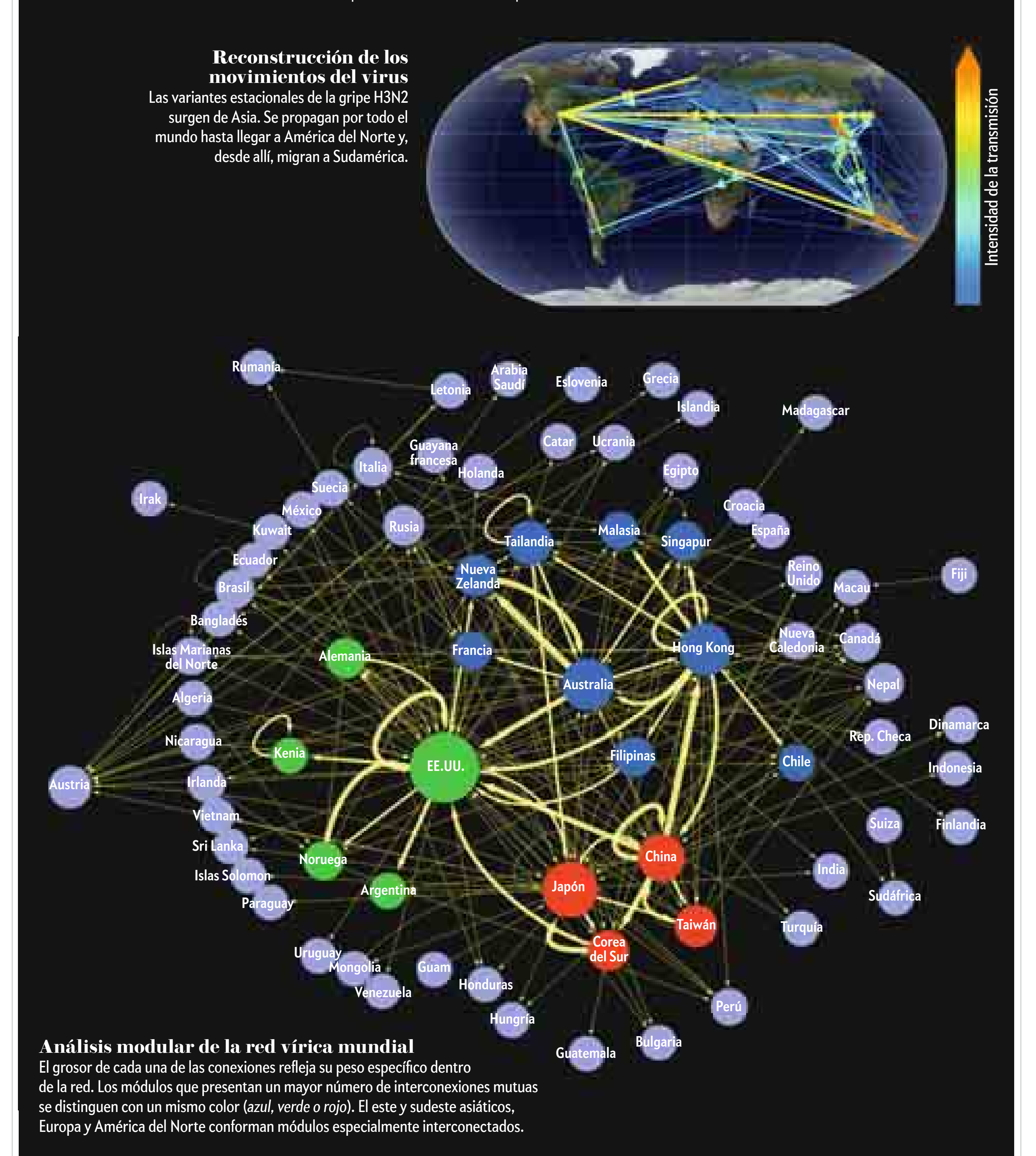
REDES VÍRICAS

Implementar una campaña de vacunación en el momento y lugar adecuados requiere conocer las pautas de propagación del virus a lo largo del planeta. Todos sabemos que en las latitudes altas la gripe aparece en invierno: entre noviembre y abril en el hemisferio norte, y entre mayo y septiembre en el sur. En los trópicos, sin embargo, la enfermedad persiste durante todo el año,

Tras los pasos del virus

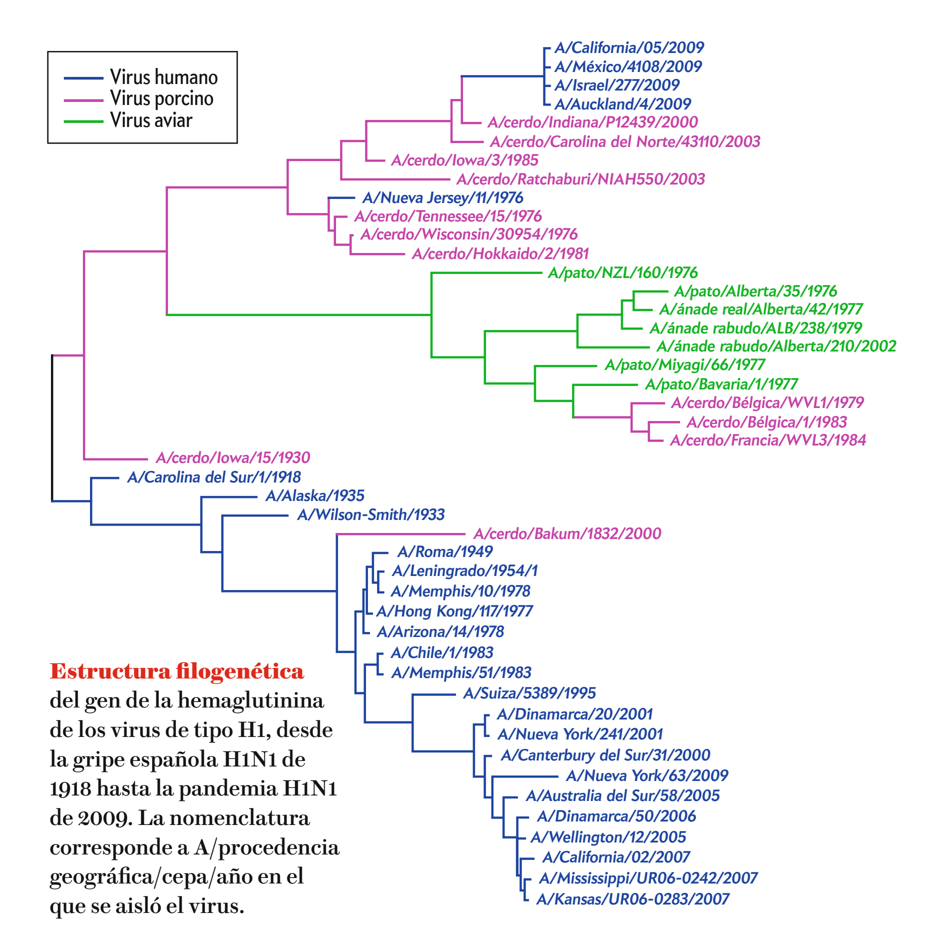
Las técnicas de secuenciación masiva han puesto a disposición de los investigadores el genoma de unos 60.000 virus de la gripe aislados en todo el mundo. Estudiar ese volumen de datos con técnicas de análisis de redes (las mismas que se emplean en Internet o en el estudio de las redes sociales) permite deducir los patrones de propagación del virus por el planeta.

El análisis de las redes víricas permite averiguar qué nodos (localizaciones geográficas) ejercen una mayor influencia sobre el conjunto de la red, así como cuales se agrupan en módulos (grupos más interconectados entre sí que con el resto). Los módulos de una red vírica revelan grupos de riesgo o factores que facilitan el contagio; identificar las regiones geográficas que ejercen una mayor influencia sobre el tráfico mundial de virus permitiría diseñar campañas de vacunación más eficaces.



Reconstrucción de los movimientos del virus
Las variantes estacionales de la gripe H3N2 surgen de Asia. Se propagan por todo el mundo hasta llegar a América del Norte y, desde allí, migran a Sudamérica.

Análisis modular de la red vírica mundial
El grosor de cada una de las conexiones refleja su peso específico dentro de la red. Los módulos que presentan un mayor número de interconexiones mutuas se distinguen con un mismo color (*azul, verde o rojo*). El este y sudeste asiáticos, Europa y América del Norte conforman módulos especialmente interconectados.



Estructura filogenética del gen de la hemaglutinina de los virus de tipo H1, desde la gripe española H1N1 de 1918 hasta la pandemia H1N1 de 2009. La nomenclatura corresponde a A/procedencia geográfica/cepa/año en el que se aisló el virus.

CORTESÍA DEL AUTOR

con menores variaciones estacionales pero con un número similar de afectados. ¿Qué mecanismos dictan estos ciclos y qué localizaciones geográficas actúan como focos de la enfermedad?

En principio, la comparación de los genomas de cepas aisladas en diferentes regiones y momentos nos permite rastrear los movimientos del virus. Este tipo de análisis se enfrenta, no obstante, a una dificultad: el repertorio de genomas disponibles presenta fuertes asimetrías geográficas y estacionales. Aunque disponemos de numerosas secuencias de cepas aisladas en América del Norte y en otras zonas de latitudes altas, otras regiones, como Sudamérica o los trópicos, no quedan tan bien representadas en las bases de datos. Sin embargo, la teoría de análisis de redes permite contrarrestar estas deficiencias. En 2010, junto a mis colaboradores de la Universidad de Columbia Joseph Chan y Antony Holmes, propusimos un método probabilístico que nos permitió rastrear los movimientos del virus y establecer sus redes de conexión mundiales.

Podemos pensar las redes de conexiones de virus como análogas a las redes sociales o a las que existen en Internet: hay páginas web que incluyen un gran número de enlaces externos, otras que son visitadas por un muchos usuarios, grupos de sitios con enlaces mutuos que dan lugar a módulos (individuos con intereses comunes) y también, claro, páginas web poco conectadas con el resto. Dos conceptos de gran utilidad para analizar esta clase de conexiones son centralidad y modularidad. La centralidad de un nodo (zonas geográficas, en nuestro caso) mide su influencia sobre el conjunto de la red. La modularidad, por otro lado, hace referencia a conjuntos de nodos que se encuentran más conectados entre sí que con el resto. En las redes sociales, los grupos como la familia o los amigos constituyen ejemplos de módulos. El estudio de la modularidad de las redes de enfermedades infecciosas puede servir para detectar grupos de riesgo o para averiguar qué factores facilitan el contagio.

Para reconstruir las redes de conexiones víricas, podemos preguntarnos qué continentes o países aparecen como fuentes o sumideros de virus, qué lugares destacan por su contribución al tráfico mundial de gripe o qué módulos de circulación vírica existen. Estas preguntas pueden afrontarse mediante técnicas similares a las que se emplean en el estudio de Internet. De hecho, nuestro análisis empleaba algoritmos como PageRank, que es el que utiliza Google para determinar las páginas web más relacionadas con nuestra búsqueda. Gracias a estas técnicas logramos deducir que, en general, las variantes estacionales surgen de Asia, se propagan después hasta América del Norte y, desde allí, prosiguen hacia Sudamérica. Hallamos también que los trópicos y el sudeste asiático aparecen como centros importantes en la distribución del virus, así como la existencia de módulos muy interconectados en el este y sudeste asiáticos, Europa y América del Norte.

PATRONES EVOLUTIVOS

La alta tasa de evolución del virus de la gripe nos permite seguir sus pasos no solo a través de la geografía, sino también en el tiempo. Los virus de la gripe A suelen clasificarse según sus proteínas de superficie hemaglutinina (H, de la que existen 17 subtipos) y neuraminidasa (N, que presenta 9 subtipos). Las pandemias de 1918 y 2009 fueron provocadas por virus de la variedad H1N1. La de 1957 (gripe asiática) se debió a un virus H2N2, y la de 1968 (gripe de Hong Kong), a uno del tipo H3N2. Además, las diferentes cepas de cada variedad se distinguen según el huésped, su procedencia geográfica y la fecha en la que se ha aislado el virus.

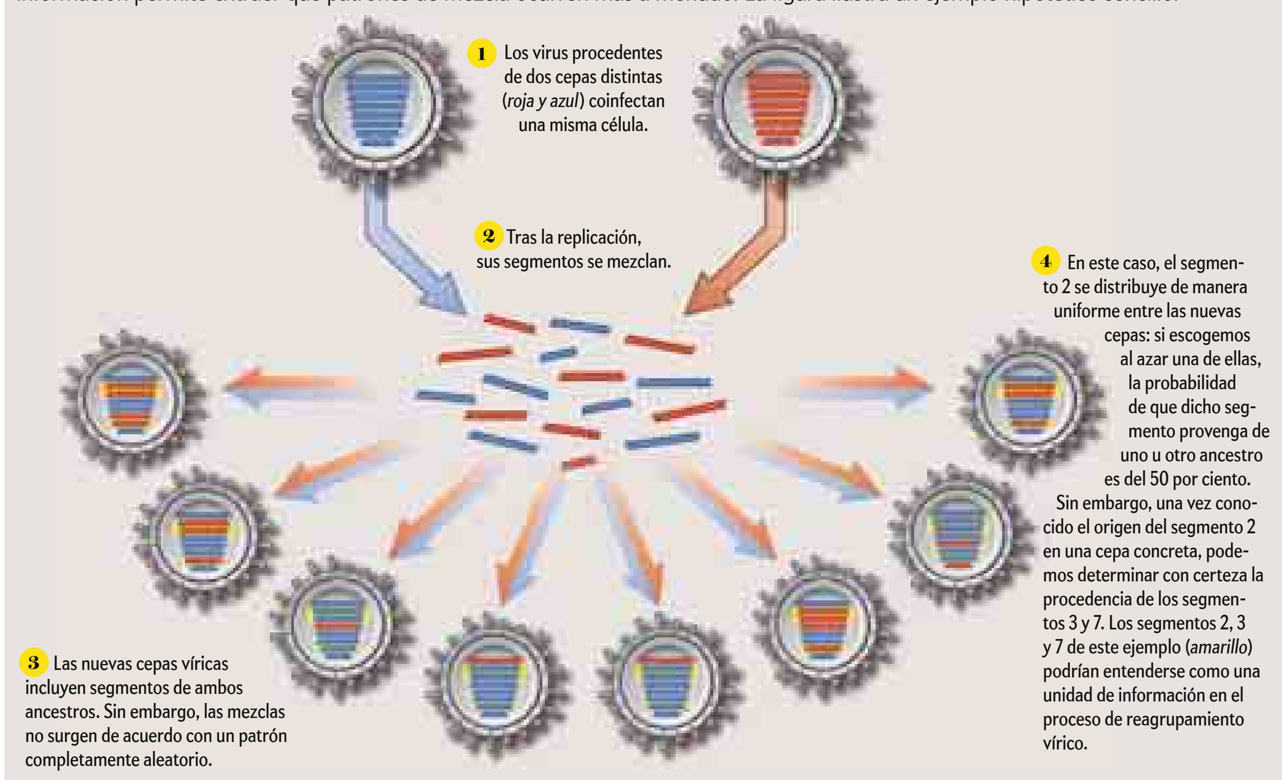
El método usual para estudiar la historia evolutiva de una especie consiste en reconstruir su árbol filogenético (las relaciones de parentesco que guardan entre sí las diferentes cepas). En el caso de los virus de tipo H1, hemos rastreado la senda evolutiva que siguió el virus desde la gripe española de 1918 hasta la pandemia de 2009. El origen de la pandemia de 1918, sin embargo, permanece incierto. Algunos investigadores, incluido nuestro grupo de la Universidad de Columbia, pensamos que es de procedencia aviar. Lo que sí se sabe es que no solo infectó a humanos, sino también a cerdos en América del Norte. Desde entonces, sus descendientes se establecieron independientemente en humanos en todo el mundo y en cerdos en América del Norte. Este virus H1N1 reemplazó a los que circulaban con anterioridad y se convirtió en la gripe estacional.

A lo largo de la evolución del virus, no todas las mutaciones aparecen con la misma probabilidad. Las técnicas filogenéticas tradicionales clasifican los organismos en función de las semejanzas que guardan sus genomas. Sin embargo, otro posible análisis consiste en comparar sus patrones evolutivos. Por emplear una analogía tomada de la física, podemos decir que la filogenia estudia los cambios de posición a lo largo de una trayectoria, mientras que el análisis de las mutaciones equivale a comparar la dirección de las velocidades. En particular, dado que la gripe

PATRONES DE MEZCLA

Reagrupamiento e intercambio de información

Cuando dos o más virus coinfectan una misma célula, sus segmentos pueden mezclarse. Este proceso, denominado reagrupamiento, origina nuevas cepas con gran rapidez y desempeña un papel fundamental en el origen de las pandemias. Sin embargo, no todas las combinaciones posibles se dan con la misma frecuencia en la naturaleza. El análisis del genoma del virus con técnicas de teoría de la información permite extraer qué patrones de mezcla ocurren más a menudo. La figura ilustra un ejemplo hipotético sencillo.



infecta a varios huéspedes, podemos preguntarnos por las mutaciones que afectan a los virus humanos, aviares o porcinos.

En 2006, junto a Arnold Levine y Harlan Robins, por entonces mis colaboradores en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, encontramos que los virus de la gripe en humanos presentaban un patrón de mutaciones distinto del de los aviares. Entre otras características, observamos un incremento de las bases uracilo y adenina, en detrimento de las de guanina y citosina, respectivamente, a medida que el virus evolucionaba en humanos. El efecto es sutil (un 2 por ciento en 90 años de evolución), pero constante, lo que nos permite identificar el huésped a partir del genoma del virus y reconstruir las trayectorias evolutivas (una trayectoria evolutiva es el camino medio más probable que une los cambios registrados en el genoma).

Siguiendo las trayectorias evolutivas hacia el pasado, resulta posible identificar el huésped a partir del cual se originó una pandemia. En concreto, el genoma del virus de la gripe española presenta un espectro de mutaciones muy similar al de los virus que se encuentran actualmente en aves, lo que apuntaría a un origen aviar. Las trayectorias evolutivas también nos permiten inferir cambios futuros en el genoma vírico y entender los procesos de adaptación de un virus a su huésped.

CÓCTELES DE VIRUS

Además de mutar, los virus de la gripe disponen de otro mecanismo evolutivo, similar en cierto sentido a la reproducción sexual. El material genético del virus viene empaquetado en 8 segmentos independientes, los cuales codifican hasta un total de 11 proteínas. Esta disposición del genoma implica que, cuando dos o más virus procedentes de cepas distintas coinfectan una misma célula, sus segmentos pueden mezclarse: cada una de las nuevas partículas víricas puede tomar algunos segmentos de un ancestro y otros del segundo.

Ese reagrupamiento desempeña un papel fundamental en el proceso de evolución de la gripe. No solo porque se suma a la ya de por sí elevada tasa de mutaciones del virus, sino porque puede generar nuevas variedades con gran rapidez. Si dos virus coinfectan una célula, pueden producirse $2^8 = 256$ nuevas combinaciones; tres de ellos, $3^8 = 6561$, y cuatro, $4^8 = 65.536$. Hoy sabemos que el reagrupamiento fue el mecanismo responsable de al menos tres de las cuatro pandemias del siglo xx. La de 1957 (un virus de tipo H2N2) se debió a un reagrupamiento en el que un virus aviar y un humano intercambiaron tres segmentos. En 1968, dos segmentos de gripe aviar aparecieron en un nuevo virus del tipo H3N2. Como veremos, también la pandemia H1N1 de 2009 se originó como consecuencia de una compleja cadena de reagrupamientos.

Si deseamos reconstruir la historia de los procesos de reagrupamiento durante la evolución del virus, un primer paso consiste en averiguar qué cepas nacieron a partir de combinaciones de otras. Para responder a esta pregunta, nuestro grupo ha desarrollado varios métodos estadísticos. La idea principal es

sencilla: si dos virus descienden de un ancestro común, todos sus segmentos deberían diferir en un número de mutaciones aproximadamente proporcional a su longitud (cada segmento cuenta con una extensión diferente: el de mayor tamaño contiene unos 2400 nucleótidos; el menor de ellos no llega a 900). En caso contrario, podemos concluir que alguno de los segmentos posee un origen distinto; es decir, podemos inferir la existencia de un reagrupamiento en la historia del virus. Al analizar todos los pares de virus y de segmentos, resulta posible evaluar cuáles de ellos han aparecido como mezclas.

Una vez identificados los reagrupamientos en la historia del virus, podemos preguntarnos por los patrones más frecuentes de mezcla. En principio, si dos virus coinfectan una misma célula, pueden producirse 256 nuevas reagrupaciones. Pero ¿se dan realmente todas esas combinaciones en la naturaleza? Si consideramos el reagrupamiento de dos virus, esperaríamos que la mayoría de las combinaciones contuviesen 4 segmentos de un ancestro y 4 del otro. La distribución de reagrupamientos debería asemejarse al reparto de caras y cruces que obtendremos al lanzar una moneda 8 veces: aunque en algún caso observaremos 8 cruces, mucho más a menudo obtendremos 2 caras y 6 cruces, con más frecuencia aún veremos 3 caras y 5 cruces, etcétera. Ese reparto se conoce como distribución binomial.

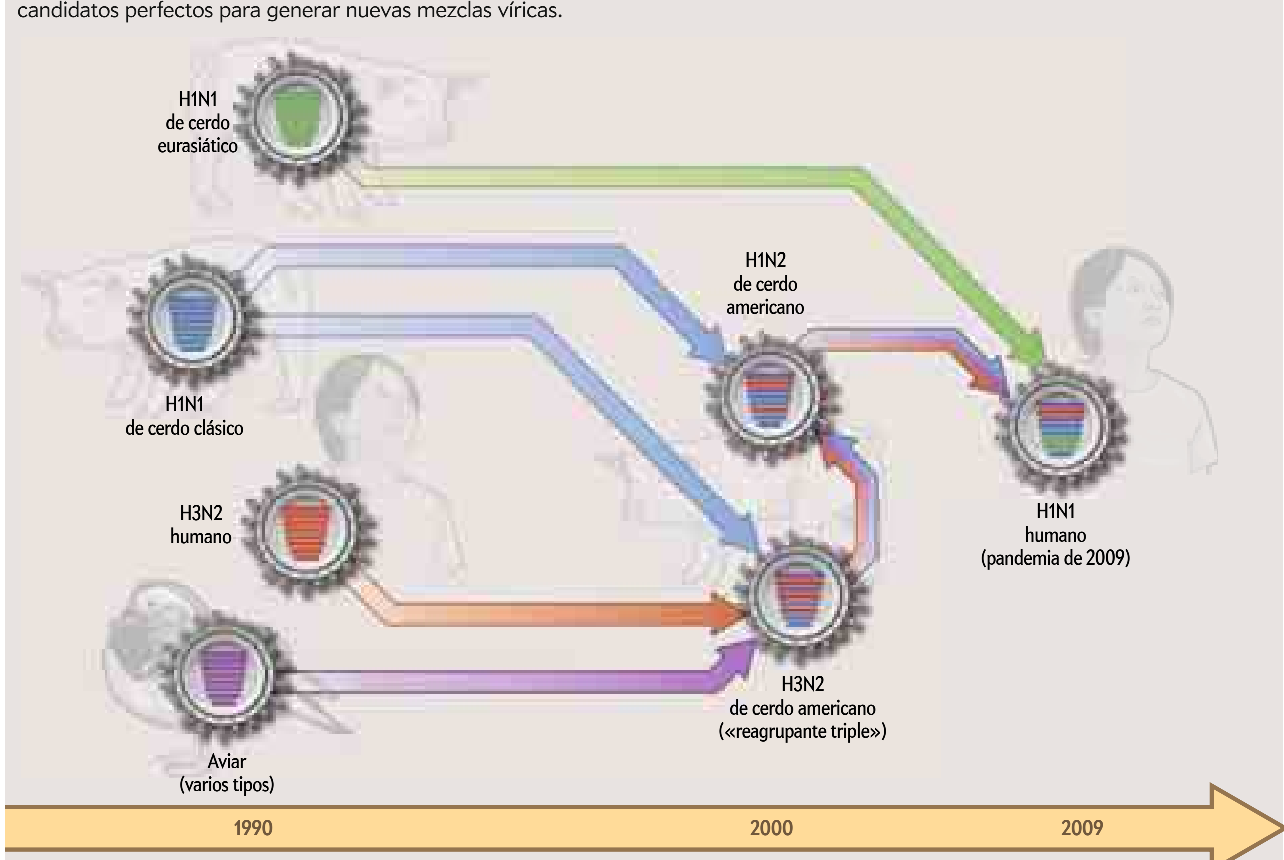
Sin embargo, la mayoría de las reagrupaciones de virus no respetan el patrón binomial. Para determinar qué mezclas víricas se producen más a menudo, podemos estudiar qué subconjuntos de segmentos guardan más relaciones de lo esperado. Lo más sencillo consiste en comenzar con dos segmentos y preguntarnos hasta qué punto podemos deducir el origen del primero si conocemos la procedencia del segundo. Las herramientas de la teoría de la información (cantidades como entropía, información mutua o correlación total) nos permiten calcular este tipo de correlaciones. Por ejemplo, si dos segmentos son independientes, su información mutua será cero (o muy próxima a cero, por fluctuaciones estadísticas). En cambio, si el origen de uno de ellos permite predecir el de su compañero, la información mutua será elevada. Esta idea puede extenderse a subconjuntos arbitrarios de segmentos.

En humanos nos encontramos varias mezclas por año, que, por lo general, tienen lugar entre virus del mismo tipo (H3N2 y H1N1). Pero los patrones de mezcla más interesantes aparecen en los virus porcinos. Por lo general, los virus humanos no infectan a aves y los aviares no se transmiten a humanos. Sin embargo, los virus humanos y algunos aviares se encuentran muy a menudo en cerdos, por lo que estos animales constituyen candidatos perfectos para engendrar nuevas mezclas [*véase*

REAGRUPAMIENTO Y PANDEMIAS

El origen de la pandemia de 2009

Los procesos de reagrupamiento han provocado al menos tres de las cuatro pandemias que se declararon durante el siglo pasado. La pandemia de 2009 apareció como consecuencia de una compleja trama de mezclas víricas en cerdos. Hoy sabemos que estos animales acogen con facilidad virus de otros huéspedes (algo que en humanos o aves no sucede con tanta frecuencia) lo que los convierte en candidatos perfectos para generar nuevas mezclas víricas.



«Fábricas de gripe», por H. Branswell; Investigación y Ciencia, marzo de 2011]. Al estudiar las diferentes combinaciones de virus porcinos, nuestro análisis identificó ciertos patrones de reagrupamiento más recurrentes que otros. Por ejemplo, hallamos que los segmentos encargados de codificar las polimerasas (las enzimas que intervienen en la replicación del ARN) se reagrupan con más frecuencia que el resto. De hecho —y quizá no tan sorprendentemente—, estos patrones de mezcla resultan similares a los que originaron las pandemias de 1957 y 1968.

LA PANDEMIA H1N1 DE 2009

El 9 de abril del 2009, un hombre de 54 años de edad y su hija de 16 años fueron ingresados en una clínica en San Diego con problemas respiratorios agudos. Durante las dos semanas siguientes, el número de casos con síntomas parecidos aumentó de manera drástica. El 21 de abril, los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades de EE.UU. anunciaban la detección de un nuevo virus de la gripe, relacionado con otros que estaban circulando en cerdos en América del Norte. El 24 de abril, las autoridades de salud mexicanas informaron de 854 casos de neumonía, los cuales provocaron la muerte a 59 personas. El 28 de abril, Canadá, España, Israel, Reino Unido y Nueva Zelanda refirieron casos parecidos. El 11 de junio, la Organización Mundial de la Salud declaraba una nueva pandemia.

Laboratorios de todo el mundo comenzaron a aislar y secuenciar el genoma del nuevo virus. En pocas semanas se analizaron cepas procedentes de lugares tan diversos como Nueva York, México, París, Tokio o Buenos Aires. Los genomas de todas ellas mostraban grandes semejanzas, lo que apuntaba a un origen muy reciente. Gracias a una serie de análisis estadísticos, fue posible demostrar que el ancestro común de los virus que provocaron la pandemia de 2009 había aparecido en enero de ese año, tres meses antes de que fuera identificado.

Al igual que las anteriores, la pandemia de 2009 surgió como consecuencia de una compleja trama de reagrupamientos. Nuestro grupo fue uno de los que logró reconstruir de manera parcial la historia del virus. Sus ancestros más directos habían estado circulando en cerdos en Eurasia y América del Norte. A su vez, estos últimos se hallaban relacionados con otro virus porcino, denominado «reagrupante triple», que había aparecido hacia finales de los años noventa y que contenía segmentos de origen humano, porcino y aviar. Aún desconocemos cómo, cuándo y dónde se produjo el virus pandémico y de qué manera acabó infectando a humanos. El sistema de vigilancia del virus de la gripe es insuficiente, sobre todo en lo que respecta a los de origen aviar y porcino. La imposibilidad de localizar virus relacionados con la pandemia desde 2001 hasta las primeras cepas aisladas en marzo del 2009 sugiere que, probablemente, los ancestros del virus pandémico estaban circulando en uno de los muchos lugares del mundo donde la información sobre estos virus es escasa o inexistente.

Sin embargo, aun en ausencia de tales datos resulta posible obtener información sobre la evolución del virus. El análisis del genoma de los miles de virus porcinos, aviares y humanos depositados en las bases de datos permite aislar patrones relacionados con la evolución en huéspedes diferentes. Junto a Levine y Ben Greenbaum, también del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, nuestro grupo identificó algunas señales relacionadas con el huésped de origen. En humanos, los virus tienden a suprimir determinadas combinaciones de nucleótidos, como UCGA (uracilo, citosina, guanina y adenina). Ello probablemente se deba a que este tipo de secuencias posee alguna capacidad para desencadenar una respuesta por parte de nuestro sistema inmunitario, por lo que una estrategia evolutiva del virus consistiría en suprimirlas.

¿H5N1?

Por fortuna, la pandemia de 2009 causó menos muertes que sus predecesoras. ¿Tendremos tanta suerte la próxima vez? Desde el año 2003, la gran preocupación reside en la gripe aviar H5N1. Hasta el 12 de marzo de 2012, la OMS ha referido 596 infecciones de esta gripe en humanos, entre los cuales ha habido 350 fallecimientos.

A la hora de evaluar la mortandad de una enfermedad infecciosa han de tenerse en cuenta dos parámetros. El primero es el número de personas que contraen la enfermedad; el segundo, la tasa de fallecimientos entre los infectados. La cantidad relevante es el producto de estos dos números. La gripe H1N1 de 2009 infectó a un gran número de individuos; sin embargo, no fallecieron tantos como en las pandemias anteriores (unos pocos por cada 10.000 infectados). La gripe aviar H5N1 resulta muy preocupante porque el 60 por ciento de los infectados mueren. Sin embargo, su transmisión en humanos es baja, lo que se refleja en casos dispersos en varios países (como Indonesia, Egipto, Vietnam o China). Con todo, la gran rapidez con la que evoluciona el virus nos impide saber si este mutará para propagarse entre humanos de manera eficiente.

Dicha cuestión podría responderse si supiésemos cuántas mutaciones necesita el virus para propagarse entre humanos. Si basta con una o dos, habremos de prepararnos para una pandemia de proporciones apocalípticas. Si el número ronda el centenar, la probabilidad de que el virus acabe transmitiéndose a humanos es casi nula. El estudio del problema combinatorio reviste un enorme interés. En la actualidad, varios grupos de todo el mundo estamos intentando dar respuesta a esta pregunta por medio de métodos computacionales y experimentales [*véase* «Palos en las ruedas», por Adolfo García Sastre, *en este mismo número*].

Reconstruir la evolución y el origen de los patógenos nos permite identificar qué mutaciones determinan la adaptabilidad y patogenicidad en humanos, las condiciones sociales y culturales que permiten la interacción entre humanos y otras especies, y la adaptación y propagación de virus emergentes. En el caso de la gripe, conocemos algunas mutaciones relevantes para la adaptación del virus a humanos, pero estas no son suficientes ni necesarias. La revolución genómica de los últimos años está permitiendo el desarrollo de técnicas estadísticas para evaluar dichos patrones de evolución, estimar el riesgo de posibles pandemias, identificar insuficiencias en la vigilancia de patógenos emergentes y guiar la puesta en marcha de medidas de salud pública.

PARA SABER MÁS

Characterization of the 1918 influenza polymerase gene. J. K. Taubenberger, A. H. Reid, R. M. Lourens, R. Wang, G. Jin y T. G. Fanning en *Nature*, vol. 437, págs. 889-893, 2005.

Patterns of evolution and host gene mimicry in influenza and other RNA viruses. B. D. Greenbaum, A. J. Levine, G. Bhanot y R. Rabadán en *PLoS Pathogens*, vol. 4, n.º 6, pág. e1000079, 6 de junio de 2008.

Geographic dependence, surveillance, and origins of the 2009 influenza A (H1N1) virus. V. Trifonov, H. Khiabanian y R. Rabadán en *The New England Journal of Medicine*, vol. 361, págs. 115-119, 2009.

Network analysis of global influenza spread. J. Chan, A. Holmes y R. Rabadán en *PLoS Computational Biology*, vol. 6, n.º 11, pág. e1001005, 2010.

Oligonucleotide motifs that disappear during the evolution of influenza virus in humans increase alpha interferon secretion by plasmacytoid dendritic cells. S. Jiménez Baranda, B. Greenbaum, O. Manches, J. Handler, R. Rabadán, A. Levine y N. Bhardwaj en *Journal of Virology*, vol. 85, n.º 8, págs. 3893-9904, abril de 2011.

por J. M. Fortuño, M. Masó, R. Sáez, S. de Juan y M. Demestre

Plásticos colonizados

La proliferación y dispersión de organismos marinos sobre restos de basura a la deriva pueden alterar la biodiversidad

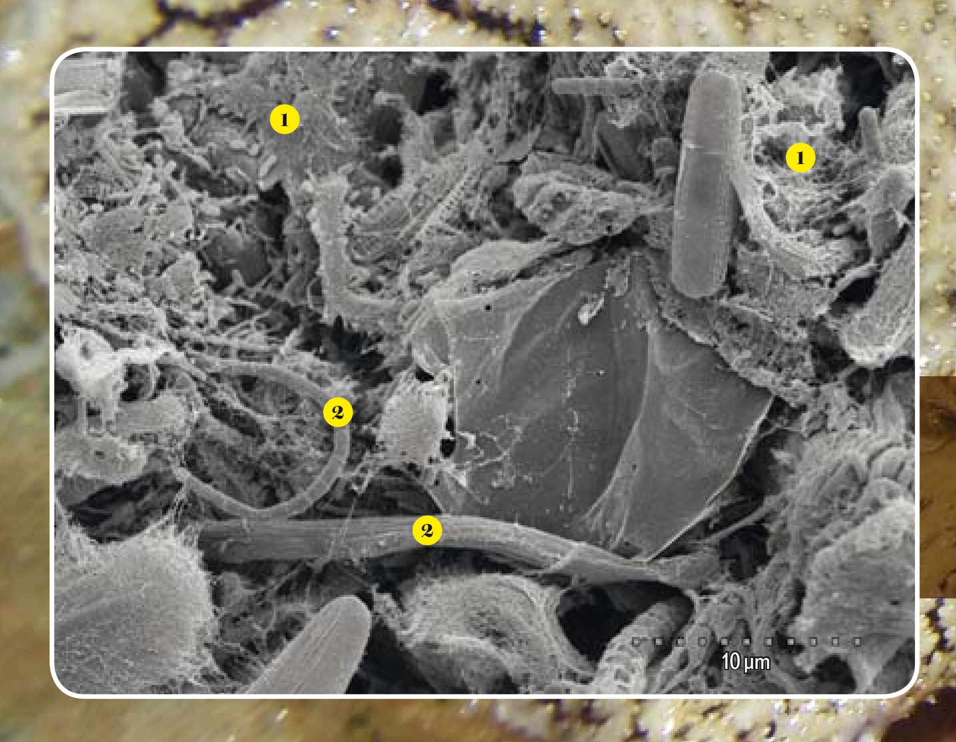
Cada vez se hace más evidente la presencia de desperdicios en nuestros mares. La basura marina está constituida por objetos manufacturados que llegan al mar de forma accidental o simplemente han sido arrojados a él. Los plásticos representan la mayor parte de esos residuos, entre un 60 y un 80 por ciento. Se trata de material sintético, formado por polímeros no biodegradables, que va fragmentándose poco a poco hasta quedar reducido al tamaño del plancton. En estas circunstancias puede ser ingerido por peces y otros animales marinos, que los confunden con alimento. El plástico se introduce así en la cadena trófica de los organismos, lo que conlleva una enorme amenaza para el ecosistema marino.

Otro efecto nocivo de la presencia de esos objetos antropogénicos en el mar se deriva de su colonización por organismos marinos. Estos utilizan los plásticos como sustrato para fijarse y crean así bioincrustaciones. En la primera fase de este proceso se forma una biopelícula de origen microbiano, una capa de menos de un milímetro de espesor constituida por polisacáridos, biopolímeros y proteínas, un medio que en sí mismo ya constituye un microhábitat.

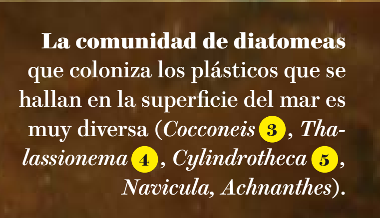
Ese tándem dinámico entre basura y organismos favorece la extensión del área de distribución de las especies colonizadoras o invasoras: los plásticos se dejan llevar por las corrientes y los organismos incrustados viajan con ellos y se dispersan por zonas nuevas. Este fenómeno puede provocar cambios importantes en la diversidad marina, al favorecer a un tipo de organismos frente a otros más vulnerables.

En estas imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido de los organismos adheridos a los plásticos se observan distintos aspectos de la biopelícula. Destacan organismos microscópicos como bacterias, hongos, protozoos, briozoos, dinoflagelados y diatomeas. El estudio de estas muestras, recogidas durante la campaña realizada en el Mediterráneo en junio de 2009 dentro del proyecto COMSOM (Evaluación del estado de comunidades bentónicas sometidas a distinto grado de impacto pesquero y basura marina como herramienta de gestión del ecosistema), nos permitirá detectar la presencia de organismos invasores. Esta dispersión de especies es cada vez más notable debido a las ingentes cantidades de plásticos que llegan diariamente a todos los mares.

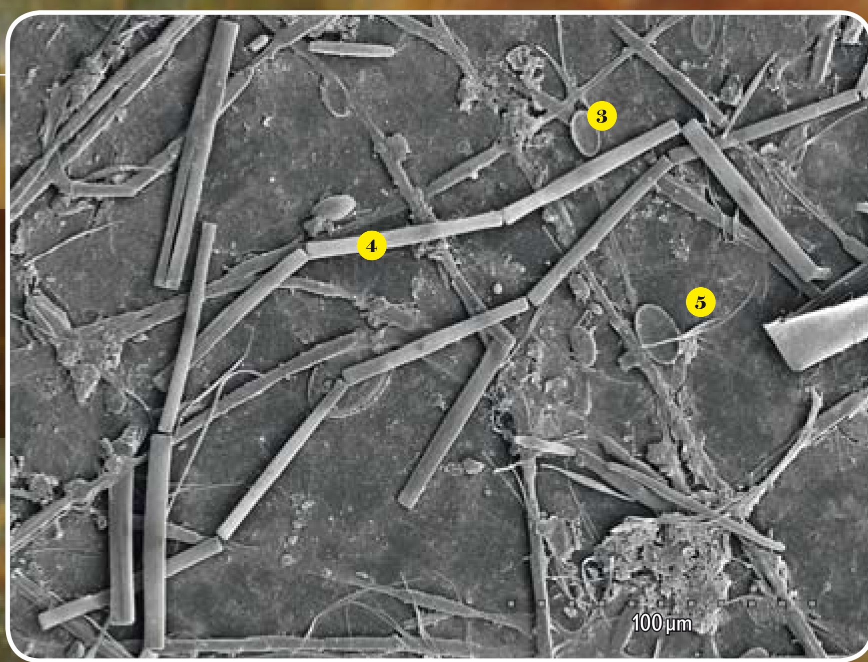
Los plásticos que retiramos del mar se nos presentan como un complejo mosaico. Las grandes manchas de colores corresponden a colonias de diferentes especies que compiten por un mismo sustrato (*imagen de fondo*).

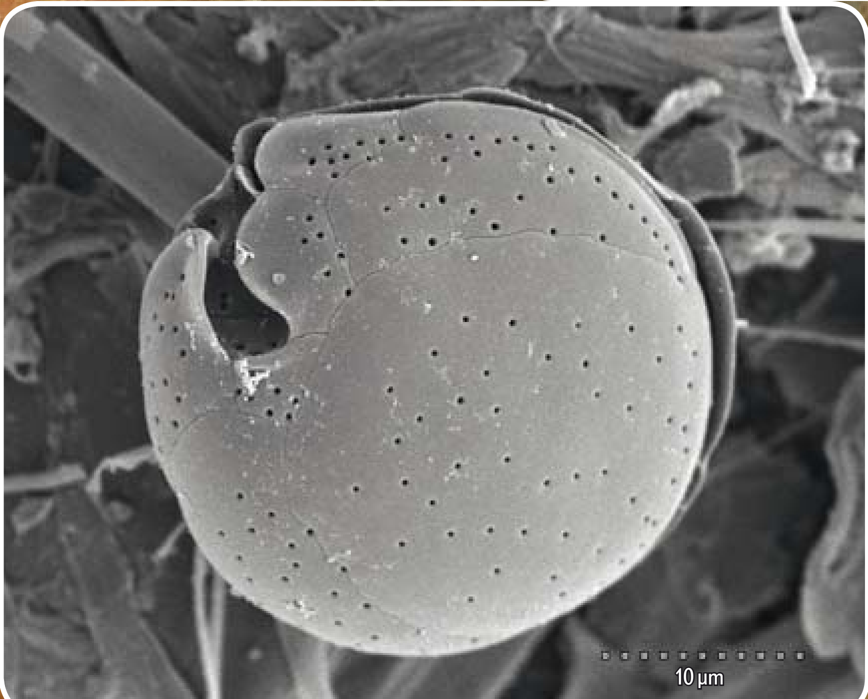


Biopelícula bacteriana que se desarrolla sobre los plásticos flotantes. Se aprecian los productos extracelulares (1) de los microorganismos, así como la presencia de hongos (2).

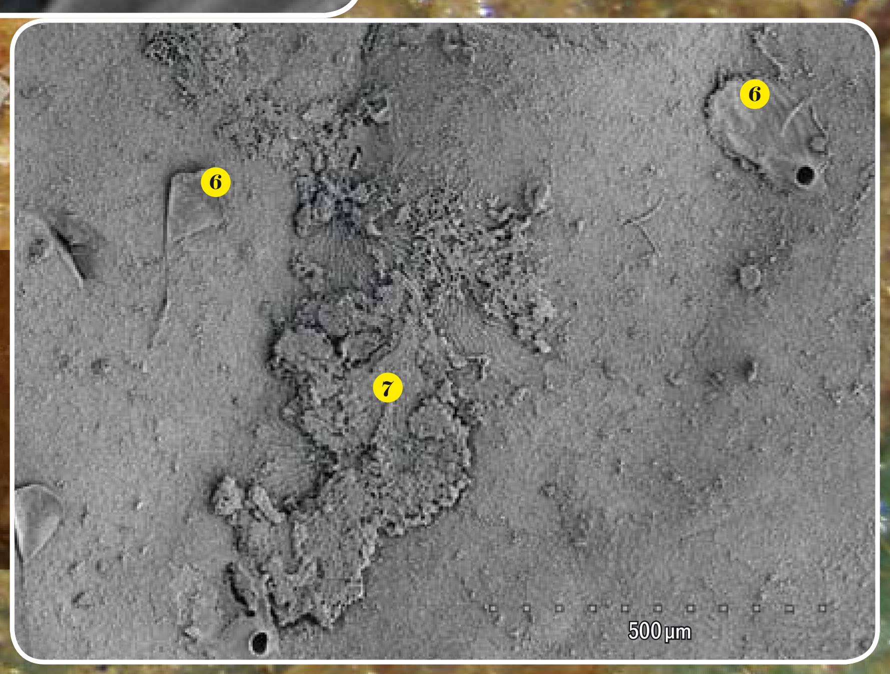


La comunidad de diatomeas que coloniza los plásticos que se hallan en la superficie del mar es muy diversa (*Cocconeis* 3, *Thalassionema* 4, *Cylindrotheca* 5, *Navicula, Achnanthes*).





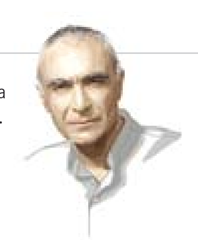
Los dinoflagelados (*Coolia monotis, en la imagen*) o las diatomeas formadoras de proliferaciones algales nocivas, así como los quistes de resistencia, han sido observados con frecuencia sobre los plásticos flotantes.



Los plásticos que se hunden hacia el fondo marino constituyen un sustrato que los organismos bentónicos aprovechan con rapidez. Bajo el microscopio muestran un aspecto distinto de los plásticos de superficie, con una mayor abundancia de protozoos 6, briozoos 7, hidroideos y poliquetos.

por Josep L. Barona

Josep L. Barona es catedrático de historia de la ciencia en la Universidad de Valencia.



Científicos en el exilio

El drama de la ciencia en España tras la Guerra Civil

El golpe militar de 1936 contra la Segunda República y los tres años de guerra civil son acontecimientos clave para la España actual. La instauración de un régimen militar dictatorial y la aniquilación de las instituciones republicanas no solo provocó una profunda crisis social, sino que se sumó a la crisis económica internacional de los años treinta y a la inestabilidad política internacional que llevó a la Segunda Guerra Mundial. Esas circunstancias extremas afectaron negativamente al cultivo de la ciencia en España. Una amplia historiografía ha puesto de relieve en los últimos años la dimensión de la represión política y el exilio de los científicos republicanos. Una historiografía que abarca orientaciones diversas e incluye historias de vida, enfoques institucionales o disciplinares. La progresiva desaparición de las grandes figuras del exilio científico en los años setenta del siglo xx originó, en los países de destino, los primeros homenajes y reconocimientos a una generación que la España franquista había silenciado.

Una parte de la historiografía actual habla de una verdadera *comunidad científica* republicana en el exilio. El concepto es discutible si se tiene en cuenta que toda comunidad científica se engendra por y para una sociedad en estrecha vinculación con el marco institucional, los laboratorios, las universidades, los hospitales y centros de investigación. La organización social de la actividad científica, integrada en el contexto internacional, refleja las inquietudes, problemas y retos de la sociedad. Por eso cabe preguntarse si puede existir una comunidad científica en el exilio, sin un referente político-social, un Estado o nación que la sustente. Ciertamente, los científicos republicanos que abandonaron España en los años treinta mantuvieron una cohesión mientras era plausible el retorno de la España republicana. Sin embargo, la consolidación del franquismo trasladó esa realidad posible al dominio de lo imaginario, y a una cohesión que les otorgó gran influencia social, política y científica en algunos de los países de destino.

La génesis de la comunidad científica española a comienzos del siglo xx fue consecuencia de la creciente importancia de las profesiones liberales en la transformación del trabajo y en los procesos de cambio social de finales del xix. El reformismo social y el regeneracionismo tuvo en la España del cambio de siglo como principales protagonistas a ingenieros, arquitectos, juristas, médicos, químicos, veterinarios, farmacéuticos y educadores, que tejieron una red de acción social con la mirada puesta en Europa, en la modernización y el progreso. La ciencia y la tecnología estaban llamadas a ser el principal instrumento del cambio. Por eso las generaciones de científicos formadas a finales del siglo xix y principios del xx no solo aplicaron su *expertise* científico-técnica al urbanismo, las infraestructuras, los transportes, la vivienda, la higiene, la asistencia médica o el control de aguas y alimentos, sino que compartieron el compromiso político para modernizar España.

El impulso a la génesis de una comunidad científica fue un elemento central del proyecto regeneracionista. Tuvo como escenarios principales Madrid y la Cataluña de la *Renaixença*, con núcleos incipientes de institucionalización en Galicia, País Vasco, País Valenciano y Andalucía. Gracias a la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas (JAE), a partir de 1910 se creó el Instituto Nacional de Ciencias, el Museo Nacional de Ciencias Naturales, el Instituto Cajal, la Misión Biológica de Galicia, se fundaron pequeños laboratorios docentes y de investigación en la Residencia de Estudiantes. Otras iniciativas dieron origen a secciones científicas y laboratorios en el Instituto de Estudios Catalanes (1907) y en el frustrado Instituto de Estudios Valencianos (1936). También se configuró una administración sanitaria central y periférica en torno a institutos municipales y provinciales de higiene, el Instituto Nacional de Higiene Alfonso XIII (más tarde Instituto Nacional de Sanidad), la Escuela Nacional de Sanidad, el Hospital Nacional de Enfermedades Infecciosas, los sanatorios marítimos, las estaciones biológicas y sanitarias del Ebro y Navalmoral.

La JAE configuró una élite científica, académica e intelectual con amplios contactos en el extranjero. En 1933 el Instituto Nacional de Ciencias contaba con una sección de electricidad dirigida por Blas Cabrera, otra de rayos X dirigida por J. Palacios, la de espectrografía por Miguel Catalán, la de electroquímica por J. Guzmán y la de pesos atómicos por Enrique Moles. El Museo de Ciencias Naturales y el Jardín Botánico de Madrid contaban con grupos de trabajo en zoología, botánica, paleontología, geología y mineralogía, donde trabajaban Ignacio Bolívar, José Gómez Royo, A. Sos Baynat y Enrique Rioja. El Instituto Cajal contaba con un laboratorio de investigaciones biológicas (Santiago Ramón y Cajal), un laboratorio de fisiología cerebral (Gonzalo Rodríguez Lafora), uno de histología normal y patológica (Pío del Río-Hortega), otro de fisiología general (Juan Negrín), un laboratorio químico de la facultad de farmacia (Antonio Madinaveitia), uno de automática (Leonardo Torres Quevedo), otro de matemáticas fundado por Julio Rey Pastor, y una serie de laboratorios en la Residencia de Estudiantes, dirigidos por Luis Calandre, José Ranedo, José M. Sacristán y Paulino Suárez. Todos ellos eran la cabeza visible de grupos docentes y de investigación, que desarrollaban prácticas de laboratorio, dirigían investigaciones de doctorado y establecían redes de contacto internacional. Allí trabajaron Rafael Méndez, José Puche, F. Grande Covián, Severo Ochoa, Marcelino Pascua, José Cuatrecasas y muchos otros. Gustavo Pittaluga dirigía la Escuela Nacional de Sanidad y representaba a España ante el Comité de Higiene de la Sociedad de Naciones, mientras Gregorio Marañón, F. Jiménez Díaz,

Sadi de Buen y Pascua dirigían la acción sanitaria.

En Cataluña, además de la Universidad Autónoma, el Instituto de Estudios Catalanes contaba con secciones científicas impusadas por M. Fargas, Ramón Turró, August Pi Sunyer, Esteve Terradas, Eduard Fontseré, Jesús M. Bellido y R. Carrasco Formiguera. En Valencia, Puche, Juan Peset Aleixandre y F. Bosch Morata participaron en la iniciativa de fundar un Instituto de Estudios Valencianos. Basten estos ejemplos para demostrar el dinamismo científico de la sociedad española a comienzos de los años treinta. Muchos de estos investigadores habían disfrutado de pensiones de la JAE en el extranjero. La labor institucional desplegada por José Castillejo fue incansable. En torno a medio millar de científicos españoles recibieron ayudas para realizar investigaciones en Alemania, Francia, Bélgica, Reino Unido, Suiza o Italia. A esto hay que añadir la labor de cooperación científica y sanitaria desplegada por la Fundación Rockefeller en colaboración con el Gobierno español desde mediados de los años veinte. Se creó el Instituto de Física y una treintena de jóvenes médicos y enfermeras recibieron formación en la Escuela de salud Pública Johns Hopkins. Ese selecto grupo iniciaría durante el bienio reformista (1931-1933) las grandes reformas sanitarias y programas de lucha contra el hambre, el paludismo, la anquilostomiasis de las minas, el cáncer o la sanidad rural.

Sin embargo, el golpe militar de 1936 y la guerra destruyeron los programas científicos y sanitarios. Los dirigentes franquistas, desde la constitución del Gobierno de Burgos, pusieron en marcha una estrategia de destrucción de las instituciones republicanas y de sus dirigentes. La legislación militar creó un estado de excepción que duró hasta 1963, año en que la normas militares como la Ley de Responsabilidades Políticas (1939) y el Tribunal Especial de Represión de la Masonería y el Comunismo (1940) fueron derogadas debido a la presión internacional y sustituidas por el Tribunal de Orden Público (1963), vigente hasta 1977. La represión fue implacable. Los expedientes de depuración exhiben la ensañada persecución de todo vestigio republicano. Algunos científicos simplemente abandonaron el país para seguir una carrera científica en el extranjero, como Ochoa en Estados Unidos. Pero el destino de ese colectivo de profesionales fue muy diverso. En 1939 las prisiones franquistas acogían a más de 700.000 presos, de los cuales casi la mitad eran presos políticos. Decenas de médicos fueron asesinados a comienzos de la guerra, entre ellos Isaac Puente, De Buen, Carlos Urtubey y Miguel Aldecoa. Muchos otros fueron apresados, acusados de auxilio a la rebelión por haberse mantenido fieles a la legalidad republicana. Los expedientes de depuración y las detenciones llevaron a la prisión a la mayoría de los médicos y científicos que permanecieron en el país. Muchos fueron inhabilitados, desterrados y algunos de ellos condenados a pena de muerte y ejecutados, como el médico y rector de la Universidad de Valencia Peset Aleixandre, fusilado en 1941. Otros vivieron un silencioso exilio interior, inhabilitados y restituidos tras su jubilación sin derecho a pensión. Pero la mayor parte de los científicos salieron hacia el exilio.



Retrato del fisiólogo José Puche. Galería de rectores de la Universidad de Valencia.

En torno al medio millar fueron a México. A pesar de que muchos exiliados vivieron etapas de exilio en Gran Bretaña o Francia, tras el final de la Segunda Guerra Mundial muchos se desplazaron a México, Venezuela, Argentina o Estados Unidos. La ayuda exterior venía tanto de organizaciones del Gobierno republicano como extranjeras, la Casa de España en México o la británica Sociedad para la Protección de la Ciencia y el Aprendizaje, además de organizaciones internacionales de ayuda a los refugiados. El intento de mantener la resistencia unida frente al franquismo llevó a crear en 1939, en París, la Unión de Profesores Universitarios Españoles en el Extranjero, presidida inicialmente por Pittaluga. En 1943 contaba con una nómina de 73 catedráticos de universidad y 142 profesores universitarios. Los rectores de las universidades de Madrid, Barcelona, Valencia y Granada, todos ellos científicos, formaban parte de la misma.

La política desarrollada por Lázaro Cárdenas para acoger a la élite intelectual republicana dio frutos. Facilitó la convalidación de títulos profesionales y agilizó los trámites para ejercer la profesión. A comienzos de los años cuarenta una elevada proporción de médicos en México eran exiliados españoles; crearon el Ateneo Ramón y Cajal (1942) y secciones científicas en el Ateneo Español (1950), y fundaron *Ciencia. Revista hispanoamericana de ciencias puras y aplicadas* (1940-1975). Su objetivo era mantener la cohesión de los científicos exiliados y servir de exponente de su producción científica. Muchos de los científicos y médicos exiliados en México se implicaron en la creación de instituciones de investigación semejantes a las de la España republicana. Rodríguez Lafora, Isaac Costero y Dionisio Nieto fundaron un Laboratorio de Estudios Médicos y Biológicos; Madinaveitia impulsó un Instituto de Química, y Costero y Méndez, un Instituto Nacional de Cardiología, con el apoyo de Ignacio Chávez.

El exilio deparó trayectorias muy distintas. Algunos desarrollaron una carrera científica brillante, como Josep Trueta, Severo Ochoa, Grande Covián, Pascua o Pi Sunyer. Otros apenas tuvieron oportunidad de rehacer su vida científica, y fallecieron en el exilio pocos años después, como Negrín, Cabrera o del Río-Hortega. Otros iniciaron una nueva vida, como Puche, o regresaron a España con éxito, como Marañón, o represaliados, como Moles. Son solo unos nombres de una generación de científicos que merece formar parte de la historia. Para ellos la ciencia era un instrumento de modernización y cambio social, algo incompatible con la dictadura que los llevó al exilio.

PARA SABER MÁS

Ciencia española en el exilio (1939–1989). El exilio de los científicos españoles. Francisco Giral. Anthropos; Madrid, 1994.

La medicina en el exilio republicano. Francisco Guerra. Universidad de Alcalá, Madrid, 2003.

La destrucción de la ciencia en España: Depuración universitaria y franquismo. Luis E. Otero Carvajal. Editorial Complutense, Madrid, 2006.

El exilio científico republicano. Dirigido por J. L. Barona. PUV, Valencia, 2010.

UNIVERSIDAD DE VALENCIA

por Adolfo García Sastre

Adolfo García Sastre es profesor de microbiología en la Escuela de Medicina Monte Sinaí de Nueva York.



Palos en las ruedas

Sin la publicación completa de las investigaciones sobre el virus de la gripe aumenta el riesgo de no estar preparados para la próxima pandemia

Pese a todos los avances médicos realizados en el último siglo, no estamos todavía preparados para combatir una pandemia de gripe grave: las vacunas existentes son específicas para los virus circulantes y lleva más tiempo preparar una vacuna contra el nuevo virus pandémico que lo que tarda este en propagarse; no se dispone de la cantidad suficiente de antivíricos para tratar a un número elevado de pacientes, y es imposible predecir el momento, la gravedad y la cepa causante de la próxima pandemia.

¿Qué tipo de investigaciones deben priorizarse? Por un lado, necesitamos desarrollar vacunas que nos protejan de cepas múltiples. Por otro, se requieren nuevos antivíricos, ya que el virus de la gripe es capaz de desarrollar resistencia contra los antivíricos existentes. Y por último, para poder atajar una pandemia antes de que surja, resultaría de gran utilidad conocer los mecanismos de generación de virus pandémicos.

Con respecto a esa última área de investigación, se ha desatado un intenso debate. Ron Fouchier, del Hospital Universitario Erasmus en Róterdam, y Yoshihiro Kawaoka, de la Universidad de Wisconsin-Madison, enviaron a *Science* y *Nature* sendos artículos sobre sus últimos experimentos con virus H5N1. Sin embargo, por indicación del Consejo Asesor Científico Nacional para la Bioseguridad de EE.UU. (NSABB), todavía no se han publicado.

De esos virus sabemos que inducen una enfermedad fulminante en aves de corral. Que se han extendido y establecido en distintos países de Asia y África. Que se han detectado más de 500 casos de infecciones en humanos, de las cuales más de la mitad han acabado en fallecimiento. Y que no se transmiten entre humanos. Desconocemos, en cambio, si desarrollarán la capacidad de transmitirse en humanos (lo cual desencadenaría una pandemia) y, en ese caso, si su virulencia sería como la que presenta en aves de corral (pandemia devastadora) o más cercana a la de la pandemia H3N2 de 1968 (menos grave).

¿Cuál es la aportación de los trabajos de Fouchier y Kawaoka? Mediante la introducción de mutaciones asociadas con adaptaciones a mamíferos, los dos laboratorios han obtenido, de modo independiente, virus H5N1 capaces de transmitirse en hurones a través del aire. (El hurón constituye un buen modelo animal para estos estudios porque las cepas que se transmiten en humanos también se transmiten en este pequeño mamífero, mientras que las cepas aviares, no). Las implicaciones de estos resultados son claras: el virus H5N1 podría evolucionar y hacerse más transmisible en humanos. Los virus H5N1 aviares con alguna de esas mutaciones tienen un mayor potencial de convertirse en pandémicos. Pero no tenemos ninguna certeza de que ello acabe ocurriendo, puesto que no todos los virus transmisibles en hurones lo son también en humanos. Necesitamos seguir estudiando las adaptaciones asociadas con la transmisión en mamíferos, para valorar mejor su riesgo y desentrañar los mecanismos subyacentes. Ello nos dotaría de herramientas para interrumpir la transmisión de la gripe. Pero para que esta investigación avance, los científicos necesitamos compartir nuestro trabajo.

¿Por qué entonces no se han publicado los experimentos de Fouchier y Kawaoka? Los expertos del NSABB recomendaron que dichos estudios se publicaran sin los detalles que permitieran a posibles agentes bioterroristas generar estos virus y aconsejaron el desarrollo de un sistema que asegure que esos datos los comparten solo individuos que trabajen para el beneficio de la humanidad. De estas recomendaciones se desprende que la información es peligrosa si cae en manos irresponsables, lo que ha generado un debate sobre cuán peligrosos son estos experimentos e incluso sobre si deberían realizarse.

Lo que no se ha explicado bien es que la probabilidad de que los virus H5N1 adaptados a hurones resulten peligrosos para los humanos es mínima (no inducen enfermedad grave en hurones cuando se transmiten por vía aérea y se transmiten con menor eficiencia que los humanos). Además, es muy probable que los virus posean adaptaciones asociadas solo con la replicación en hurones, no en humanos. Y aun suponiendo que fueran realmente peligrosos, si un grupo bioterrorista se propusiera generarlos a partir de la información publicada, antes debería conocer muy bien la biología y las técnicas de manipulación del virus; y, en ese caso, ya no necesitaría los detalles de los estudios de Fouchier y Kawaoka, puesto que podría generar los virus por su cuenta.

Para paliar los temores que puedan haberse generado, los científicos que trabajamos con virus de la gripe hemos decidido adoptar una moratoria. Tal y como expusimos en una carta publicada en línea el 20 de enero en *Nature*, hemos acordado detener los experimentos con virus H5N1 transmisibles en mamíferos hasta que se comprenda la importancia de estas investigaciones y se entienda que no nos ponen en mayor riesgo del que tenemos ahora de sufrir una pandemia. A este respecto, una segunda comisión de expertos internacionales de la OMS ha reconocido la importancia de estos experimentos y ha recomendado la publicación de todos sus detalles.

Con todo, el debate continúa. Los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU. han pedido al NSABB que analice de nuevo sus recomendaciones a la luz del informe de la OMS y de los nuevos datos sobre la virulencia de los virus H5N1. Esperemos que reconsideren sus valoraciones. De lo contrario, la investigación sobre el virus de la gripe se verá seriamente dañada. Y esto sí que aumentaría el riesgo de no estar preparados para la próxima pandemia.

DAN HIGGINS, CORTESÍA DE CDC/DOUGLAS JORDAN

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

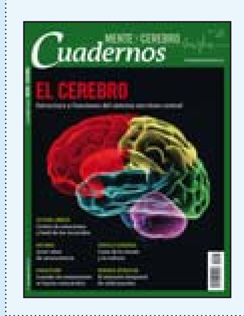
Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad

MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€

GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

Philip T. Pienkos, **Lieve Laurens** y **Andy Aden** trabajan en el Centro Nacional de Bioenergía en el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), una unidad que investiga el desarrollo, la comercialización y la implantación de energías renovables. Pienkos es biólogo molecular y gestor principal del grupo de ciencias aplicadas en el NREL. Laurens es bioquímico e investigador en biología aplicada. Aden, ingeniero químico, supervisa la investigación de biorrefinerías.



ENERGÍA

Biocombustibles de microalgas

Un enorme potencial se enfrenta a multitud de desafíos científicos, ambientales y económicos

Philip T. Pienkos, Lieve Laurens y Andy Aden

La presión para hallar alternativas a los combustibles fósiles moviliza a científicos y empresarios de todo el mundo hasta niveles insospechados. Cada vez más, a los consumidores se les está impulsando a imaginar un futuro en el que, además de la gasolina o el diésel, serán los biocombustibles, la electricidad de origen eólico o solar y acaso el hidrógeno los que alimentarán sus máquinas y vehículos. Aunque en EE.UU., el etanol (en su mayoría, procedente de maíz) ya reemplaza al diez por ciento de la gasolina, un abastecimiento suficiente de biocombustibles solo llegará cuando dispongamos de una oferta variada de diferentes tipos de biomasa.

El año pasado, los departamentos de Energía y Agricultura estadounidenses actualizaron el informe de 2005 conocido como «estudio de los mil millones de toneladas». Dicha revisión concluye que, en EE.UU., la cantidad máxima de biomasa terrestre (residuos agrícolas y forestales, desechos urbanos sólidos y cultivos energéticos, como el miscanto o el pasto varilla) que puede obtenerse para la producción de biocombustibles, bioenergía y otros productos biológicos no supera los 1600 millones de toneladas anuales. Si tenemos en cuenta los límites teóricos sobre la fermentación de la biomasa y el contenido energético del

Las algas verdes *Pediastrum duplex*, estrelladas, y *Scenedesmus* sp., que recuerda a una chinche de agua, vistas a 40 aumentos. La riqueza en lípidos de la biomasa de algas las convierte en buena materia prima para la elaboración de biocombustibles. Sin embargo, su implantación como alternativa a los combustibles fósiles aún requiere superar numerosos obstáculos.

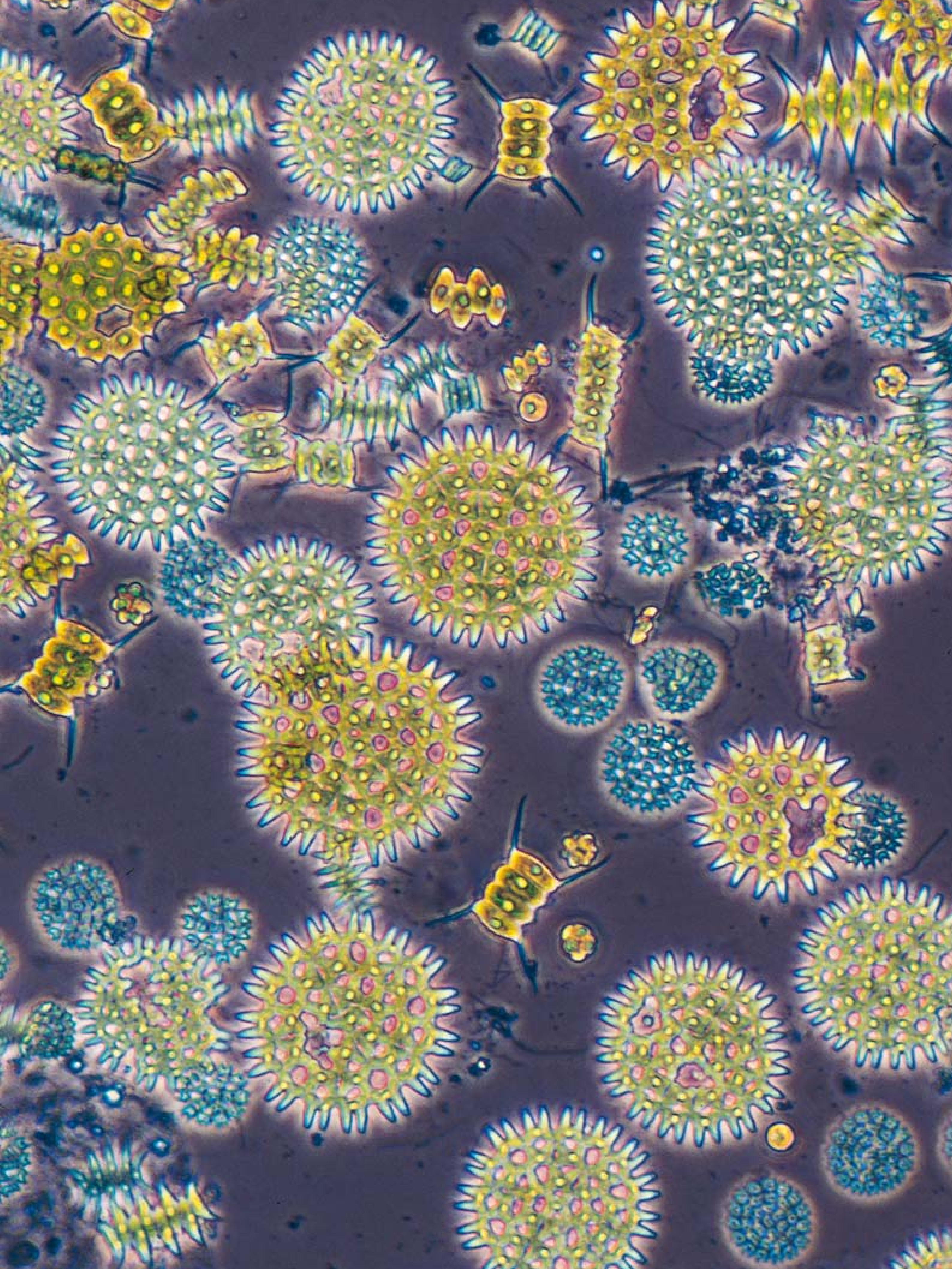
OXFORD SCIENTIFIC/PHOTOLIBRARY

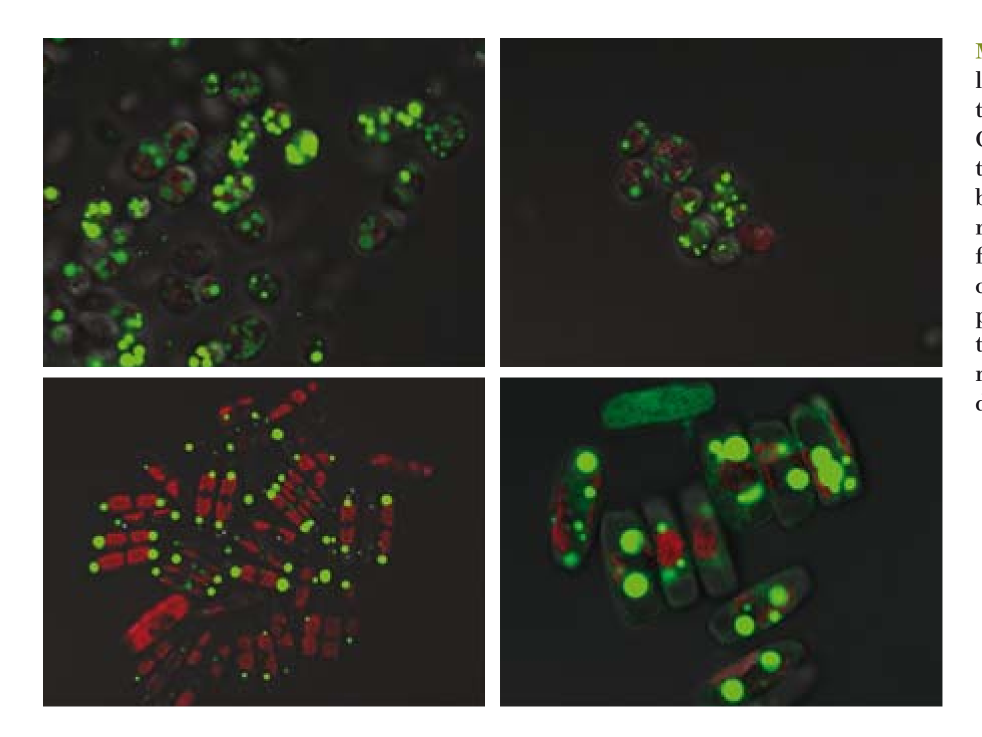
EN SÍNTESIS

Las microalgas podrían convertirse en una materia prima viable para la elaboración de biocombustibles. Algunas especies producen grandes cantidades de aceite y su cultivo no interferiría con la producción alimentaria, como ocurre con el etanol de maíz.

Sin embargo, tales promesas se hallan supeditadas a la superación de una serie de barreras de índole científica, ambiental y económica. Estas incluyen explorar nuevas cepas y métodos de explotación, así como evaluar la sostenibilidad del proceso.

Dichas incertidumbres dificultan en gran medida evaluar la sostenibilidad y la rentabilidad económica de una futura industria de biocombustibles de algas. Una parte importante de la investigación actual se centra en analizar estas cuestiones.





Microfotografías de algas unicelulares aisladas por Lee Elliott, doctorando de la Escuela de Minas de Colorado e investigador en el Laboratorio Nacional de Energías Renovables. Las células se tiñeron con dipirrometeno de boro, un tinte lipofílico fluorescente que emite luz verde cuando se disuelve en gotas de lípido, por lo que permite determinar el contenido en lípidos de las algas. La fluorescencia en rojo señala la presencia de clorofila.

CORTESÍA DE LEE ELLIOTT

etanol, dicha previsión implica una producción de no más de 365.000 millones de litros de biocombustible al año. Dado que en EE.UU. se consumen anualmente unos 530.000 millones de litros de gasolina, 150.000 millones de litros de diésel para locomoción y 75.000 millones de litros de combustible para aviones (todos ellos derivados del petróleo), podemos concluir que los biocombustibles de origen terrestre jamás cubrirán esa demanda. En el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) ya habíamos llegado a la misma conclusión cuando se publicó el estudio original. Eso nos animó a relanzar el Programa de Especies Acuáticas, que desde 1978 hasta 1996 había sido financiado por el Departamento de Energía, con miras a evaluar el potencial de los biocombustibles derivados de algas.

En nuestra opinión, las algas podrían proporcionar resultados óptimos como materia prima suplementaria para la producción de biocombustibles. Estos organismos presentan varias ventajas, entre las que cabe destacar el elevado contenido en lípidos de algunas especies y su alta productividad por unidad de superficie. Además, dado que las microalgas no constituyen una fuente habitual de alimento, su cultivo a gran escala para la obtención de combustible no debería afectar a la producción alimentaria de la misma manera en que lo hacen otras materias primas, como el maíz. Las algas crecen en una gran variedad de entornos y en todo tipo de aguas (dulce, salobre, salina e incluso residual), por lo que podrían cultivarse en terrenos no aptos para la agricultura. Se cree —si bien este dato aun requiere una confirmación rigurosa— que el uso de combustibles procedentes de algas solo generaría una mínima fracción del volumen de gases de efecto invernadero que hoy se atribuyen a los combustibles fósiles. Por último, el cultivo de algas a gran escala podría aprovecharse para obtener otros productos comercialmente viables.

Tales promesas se hallan supeditadas a la superación de una serie de barreras de índole científica, ambiental y económica. Entre ellas se incluye la necesidad de descubrir cepas más productivas y nuevos métodos de explotación, así como técnicas de cultivo ajustadas a la cantidad de agua disponible. Además, habrían de desarrollarse sistemas que extrajesen de manera eficiente los lípidos y demás productos comerciales que deseen obtenerse. Por último, aunque se venciesen todos estos obstáculos, aún debería satisfacerse una condición fundamental: el coste total del proceso debería poder competir con el de los derivados del petróleo. La investigación que llevamos a cabo en el NREL intenta abordar varios de estos retos.

MACRO Y MICRO

En primer lugar, debemos concretar qué tipo de algas se encuentran en el punto de mira de los combustibles alternativos. Las macroalgas, plantas acuáticas constituidas principalmente por carbohidratos, crecen en agua abierta, tanto dulce como salada. Durante siglos se han recolectado como alimento; valgan como ejemplo las algas nori empleadas en la elaboración de sushi o las espesantes como el agar. El Programa de Especies Acuáticas exploró las posibilidades de las macroalgas, pero abandonó el proyecto debido a los elevados costes que implicaba su recolección y conversión en combustible.

Las microalgas, en cambio, son microorganismos fotosintéticos unicelulares, omnipresentes en la naturaleza. Medran en agua dulce o salada, en lagos de elevada salinidad e incluso en desiertos y ecosistemas árticos. Se dividen a su vez en dos grandes grupos: las algas eucariotas y las procariotas (cianobacterias, o algas azul verdosas). La afinidad entre las cianobacterias y las bacterias no fotosintéticas permite su explotación mediante técnicas de ingeniería genética, lo que las convierte en un objetivo atractivo para la investigación en biocombustibles. Sin embargo, las algas procariotas carecen de un componente esencial que abunda en las eucariotas: los lípidos neutros, ricos en triglicéridos, o triacilgliceroles (TAG).

Entre las microalgas eucariotas, las algas verdes conforman el grupo taxonómico que, debido a su riqueza en aceite, suele denominarse oleaginoso. Estos organismos crecen en hábitats muy diversos y con mayor rapidez que las especies de otros taxones. Su proporción de aceite puede alcanzar el 60 por ciento de su peso celular en seco, si bien la composición de dichos aceites depende en gran medida de la especie y de las condiciones de cultivo. Para la obtención de biocombustibles se prefieren los aceites ricos en lípidos neutros. Dado que los TAG constan

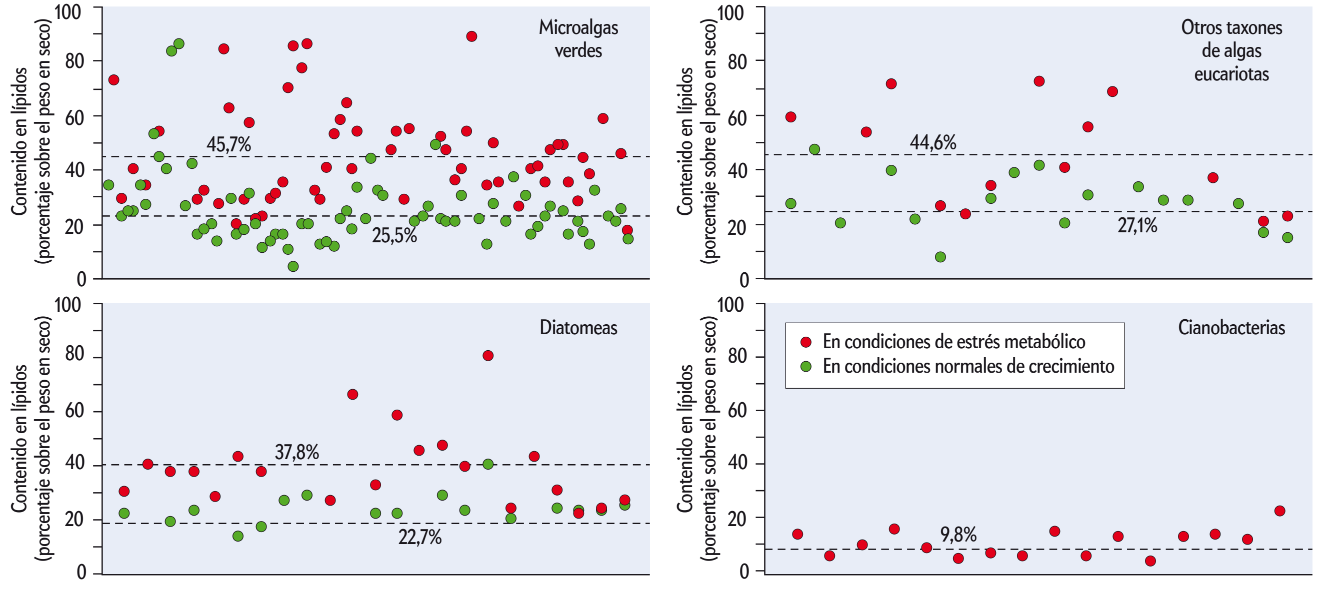
de una molécula de glicerol cuyos tres grupos hidroxilo se hallan esterificados por ácidos grasos, casi el 100 por cien de su peso puede convertirse en biocombustible. En los lípidos polares, en cambio, el glicerol solo esterifica con una o dos moléculas de ácidos grasos; los componentes restantes (azúcares o fosfatos) no pueden transformarse en combustible, por lo que el rendimiento de estos lípidos resulta mucho menor.

Los ácidos grasos son sintetizados por las enzimas de los cloroplastos. Una de ellas, la acetil-CoA carboxilasa, desempeña un papel fundamental a la hora de regular la tasa de síntesis. Durante los períodos de crecimiento activo, el metabolismo celular se centra en los procesos de fotosíntesis y producción de biomasa. Los ácidos grasos generados se localizan principalmente en lípidos polares de las membranas, como fosfolípidos y glucolípidos, esenciales para la fotosíntesis. Sin embargo, solo entre el 30 y el 50 por ciento de los lípidos polares puede convertirse en moléculas de combustible. En cambio, cuando el organismo se ve sometido a condiciones de estrés (falta de nutrientes esenciales, como el nitrógeno), el metabolismo celular rebaja la tasa de crecimiento y favorece la producción de compuestos ricos en carbono; sobre todo, carbohidratos y TAG. Aún sabemos muy poco sobre los procesos moleculares y celulares que regulan la producción de TAG. Entenderlos mejor podría servir para producir algas con una mayor proporción de lípidos neutros.

El empleo de disolventes orgánicos permite extraer aceite de células en crecimiento activo, pero este produciría más combustible si las células se hallasen sometidas a estrés. En *Chlorella vulgaris*, una cepa que nuestro laboratorio ha investigado a fondo, la cantidad de aceite extraído oscila entre el 30 y el 50 por ciento de la biomasa, tanto en condiciones de crecimiento activo como de limitación de nutrientes. Sin embargo, la capacidad de producción de combustible depende del contenido en ácidos grasos, el cual puede variar entre el 10 y el 50 por ciento de la biomasa a lo largo del ciclo de crecimiento. Estas cifras ilustran las grandes diferencias entre la cantidad de aceite que puede extraerse de las algas y su capacidad para producir combustible.

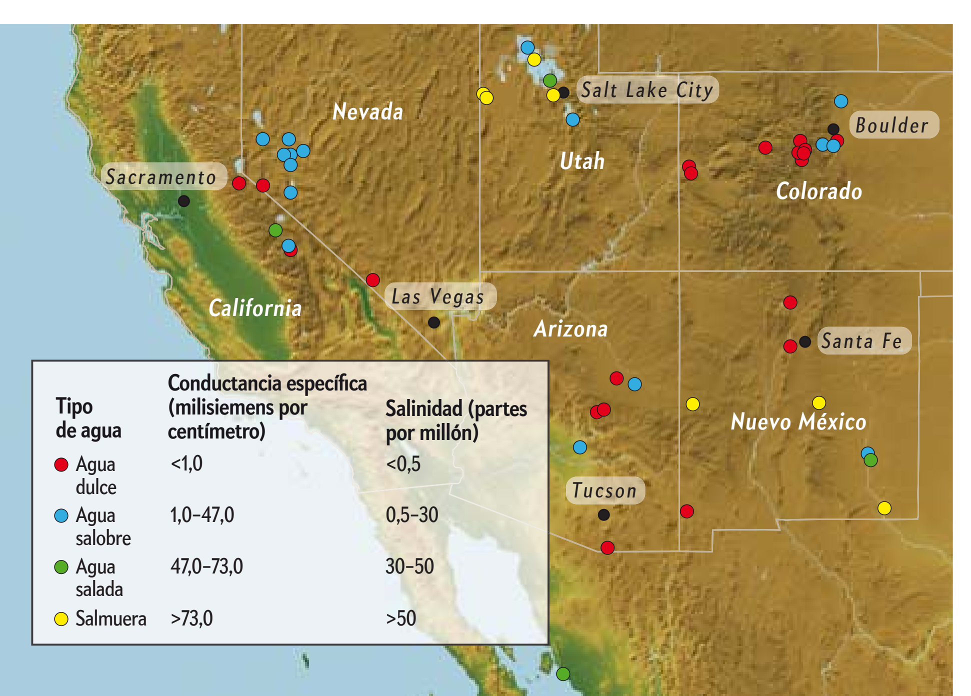
A diferencia de las plantas oleaginosas terrestres, donde el aceite se sintetiza en células especializadas, en las algas cualquier célula puede elaborar aceite. Al igual que el obtenido a partir de soja, colza, palma o de la menos conocida jatrofa, el aceite de algas puede emplearse para producir biodiésel a través de un proceso denominado transesterificación. El combustible consta de metilésteres de ácidos grasos, los cuales se obtienen gracias a un catalizador que hidroliza y metila los ácidos grasos del aceite. La siguiente etapa suele consistir en el refinado de la mezcla: se separan del combustible los componentes como el glicerol, los lípidos polares y los pigmentos residuales. Los procesos de refinación típicos (hidrotratamiento, craqueo e isomerización) dan lugar a los denominados biocombustibles de sustitución directa, muy semejantes a los derivados del petróleo, por lo que pueden reemplazarlos sin más en las infraestructuras existentes.

Una vez extraído el aceite de algas con disolventes orgánicos o con cualquier otro medio, la biomasa restante se compone, a partes aproximadamente iguales, de carbohidratos y proteínas. Esperamos que ese residuo pueda utilizarse como materia prima para obtener otros coproductos que estimulen la economía de explotación de algas. Los carbohidratos, por ejemplo, servirían para producir metano por digestión anaeróbica o etanol por fermentación; las proteínas podrían destinarse a alimento animal o incluso humano. De hecho, ya existen productos comerciales derivados de algas, como los ácidos grasos omega-3 y algunos antioxidantes, si bien el mercado de estos compuestos nutricéuticos palidece en comparación con el que prometen los biocombustibles. Encontrar coproductos con un elevado valor comercial continúa suponiendo una meta esquiva para la refinería de biomasa procedente de algas.



DATOS TOMADOS DE: «MICROALGAL TRIACYLGLYCEROLS AS FEEDSTOCKS FOR BIOFUEL PRODUCTION: PERSPECTIVES AND ADVANCES», POR QIANG HU ET AL. EN *THE PLANT JOURNAL*, 2008

Solo una pequeña parte de las especies de algas han sido examinadas a fin de evaluar su riqueza en lípidos. De ellas, solo algunas se consideran oleaginosas (con un contenido en aceite igual o superior al 20 por ciento de su peso en seco). Entre las estudiadas hasta ahora, las algas verdes se encuentran entre las que más lípidos producen, sobre todo en forma de triacilgliceroles (TAG), que almacenan carbono y energía. La síntesis de lípidos aumenta cuando los organismos se someten a condiciones de estrés metabólico. La figura muestra la proporción de lípidos hallados en varios tipos de microalgas y cianobacterias en condiciones normales (*verde*) y de estrés (*rojo*), como falta de nitrógeno y otras carencias.





El mapa señala la prospección de aguas que Lee Elliott, de la Escuela de Minas de Colorado, realizó en EE.UU. entre 2008 y 2009. Las muestras incluían desde agua dulce (salinidad inferior a 0,5 partes por millón) hasta aguas hipersalinas o salmueras (más de 50 ppm). Se necesitan cepas criadas en aguas muy diferentes para que los cultivos gocen de una amplia biodiversidad. A la derecha, el investigador toma muestras de un estanque en Golden, Colorado.

PLANETARY VISIONS LTD (*mapa*); DENNIS SCHROEDER, CORTESÍA DEL NREL (*Elliott*)

Un estudio publicado en 2011 por Mark Wigmosta y sus colaboradores del Laboratorio Nacional del Pacífico Noroccidental, adscrito al Departamento de Energía, calculó la extensión de tierra disponible para cultivo de microalgas y la disponibilidad de recursos esenciales para su crecimiento (agua, dióxido de carbono y nutrientes inorgánicos). El informe, que partió de supuestos bastante conservadores en lo referente a las tasas de crecimiento y el contenido en lípidos, concluyó que sería posible obtener unos 215.000 litros anuales de biocombustible de lípidos de algas, una cantidad que no se aleja tanto de la que podría obtenerse a partir de toda la biomasa terrestre para el mismo fin.

UNA NUEVA AGRICULTURA

La producción de tal cantidad de biomasa de algas exige desarrollar un nuevo tipo de agricultura, equiparable en escala a la dedicada al cultivo del maíz, pero centrada en una planta microscópica. Se necesitarán, pues, nuevos métodos de cultivo, recolección y tratamiento. Todo aquel que tenga una piscina mal cuidada podrá confirmar que las algas crecen sin grandes estímulos. Con fines agrícolas, sin embargo, las algas deberían crecer a gran velocidad y con la mayor concentración posible de células por litro del medio de cultivo. Esta agricultura habrá también de enfrentarse a la presencia de plagas, depredadores y agentes patógenos. Entre estos se encuentran las cepas de «malas algas» (más resistentes que las cepas productivas, pero inútiles para obtener biocombustible); ramoneadores, como los rotíferos, y agentes infecciosos, como bacterias, hongos y virus.

Gran parte de nuestra investigación se centra en el estudio de las tasas de crecimiento y el contenido en lípidos de los diferentes tipos de algas. En estos momentos, estamos llevando a cabo una tarea de bioprospección: una búsqueda de cepas naturales productivas que, además, sean resistentes a las plagas y puedan prosperar en las condiciones de luz, temperatura y composición del agua que se esperan en las instalaciones de cultivo. Para ello, empleamos técnicas de biotecnología y otras de la industria farmacéutica, como la robótica, métodos avanzados para la manipulación de líquidos o la selección de células activadas por fluorescencia. Gracias a los compañeros afiliados a la Colección de Cultivos de Algas de la Universidad de Texas, hemos aprendido a conservar muestras por criogenia y a reavivarlas después a voluntad. Se evita así el proceso tan laborioso como en ocasiones contraproducente de mantener los cultivos en placas de agar, lo que implica transferirlos con regularidad a medios purificados.

Nuestro trabajo de prospección ha puesto de manifiesto que existe una necesidad generalizada de acelerar los estudios de cuantificación de lípidos, así como de elaborar técnicas que permitan examinar con rapidez cientos o miles de cepas, algo inviable con los procesos normales de gravimetría o separación cromatográfica. En el NREL hemos desarrollado métodos de cribado ultrarrápido por espectroscopía infrarroja que estiman la proporción de lípidos en algas a partir de modelos de calibración multivariante. Hemos demostrado que tales métodos son aplicables a la cuantificación de lípidos exógenos y los hemos empleado en cientos de muestras de biomasa de más de 80 especies de algas, cuyo contenido en lípidos variaba desde el 10 por ciento hasta más del 60 por ciento durante el crecimiento del cultivo. Estos métodos permiten distinguir entre lípidos neutros y polares, algo difícil de lograr con las técnicas tradicionales, y podrían facilitar una criba muy eficaz en la detección de cepas prometedoras para proyectos de ingeniería metabólica o prospección biológica.

Además de *Chlorella vulgaris*, en el NREL estamos investigando otras algas eucariotas, como *Chlamydomonas reinhard-*

tii y especies de *Scenedesmus* y *Nannochloropsis*. *Chlamydomonas reinhardtii* no produce una gran cantidad de aceite, pero probablemente constituya la cepa de alga eucariota más común en los laboratorios. Su genoma ha sido secuenciado por completo y puede manipularse genéticamente de varias maneras. Numerosos cultivos de *Scenedesmus* y *Nannochloropsis* se han dedicado a la producción de aceite, ya que estas variedades pueden criarse con facilidad en estanques abiertos y fotobiorreactores, y ambas elaboran cantidades considerables de aceite.

Aunque la investigación mundial de algas se halle muy lejos de agotar la diversidad que ofrece la naturaleza, muchos de nosotros intentamos mejorar las cepas naturales tanto con métodos de genética clásica como de ingeniería genética. Estamos trabajando en proyectos de biología de sistemas que utilizan genómica, transcriptómica y proteómica para estudiar qué procesos moleculares revierten en una elevada productividad de lípidos; una información que permitirá dirigir los experimentos de ingeniería genética. Nuestros objetivos incluyen aumentar o disminuir los niveles de expresión génica para incrementar la proporción de lípidos en condiciones que permitan un crecimiento rápido, así como la generación de cepas más fáciles de cultivar. Un ejemplo lo proporciona la cianobacteria *Synechocystis* PCC 6803. Aunque las cianobacterias naturales no producen TAG, estamos investigando el diseño de una especie que sí pueda hacerlo. Para ello, se redirige el metabolismo del carbono para que la célula produzca ácidos grasos en lugar de carbohidratos; después, se insertan los genes que faltan para producir TAG.

La ingeniería genética suscita controversias, pues existe el temor de que los cultivos a gran escala den lugar a la aparición de cepas manipuladas cuyos genes recombinantes acaben contaminando otras especies. Con independencia de si se permite o no que las cepas manipuladas abandonen los laboratorios (en los que rigen normas muy estrictas para evitar una liberación accidental), la investigación en ingeniería genética resulta esencial a la hora de determinar si una cepa posee todas las propiedades necesarias para la producción de aceite a gran escala. Esta tarea debe realizarse en paralelo con los estudios que utilizan cepas naturales o algas obtenidas con técnicas de genética y crianza clásicas. Solo así podremos evaluar los riesgos y aplicar las medidas de seguridad pertinentes en los cultivos a gran escala.

MODELOS DE CULTIVO

Existen dos métodos básicos para cultivar microalgas fotosintéticas: estanques abiertos y fotobiorreactores cerrados. Los estanques pueden ser simples, de 20 a 30 centímetros de fondo y con muy poca o ninguna circulación del agua; o bien conductos ovalados, con divisores en el centro y norias que mantienen el agua en movimiento. Por supuesto, los estanques constituyen la solución más económica (sobre todo cuando consisten en simples zanjas abiertas en el suelo), pero protegen muy poco ante plagas, depredadores o patógenos. La relación entre la superficie y el volumen tiende a ser baja. En los cultivos densos, demasiadas algas pueden quedar a la sombra, en especial si el agua no se remueve de la manera adecuada.

Los fotobiorreactores cerrados se construyen con materiales transparentes, como vidrio o plásticos, y adoptan diversas configuraciones: paneles planos, tubos o simples bolsas de plástico que se cuelgan de un soporte o se apoyan sobre el suelo. La proporción entre superficie y volumen puede ser algo mayor, ya que estos depósitos reducen la sombra que proyectan sobre sí mismos. El diseño cerrado impide el paso de organismos patógenos al tiempo que disminuye la evaporación, lo que permite ahorrar agua. Sin embargo, la transferencia de dióxido de carbono y la acumulación de calor y oxígeno pueden suponer un problema en estos sistemas. Además, los fotobiorreactores resultan mucho más caros que los estanques. De hecho, la industria de productos nutricéuticos y suplementos alimenticios derivados de algas suele emplear estanques abiertos, por más que en dicho sector el coste de la producción de biomasa no resulte tan crítico como en la producción de biocombustible. La calidad del cultivo se controla eligiendo condiciones que fomenten el crecimiento de la cepa de interés, pero no el de otros organismos que puedan acabar en el estanque.

Nuestras estimaciones indican que los estanques abiertos serán mucho más rentables que los fotobiorreactores, si bien hasta ahora nuestro laboratorio no ha abogado por ninguna técnica en particular, pues ambas presentan ventajas e inconvenientes. Con todo, hoy por hoy cualquiera de los dos métodos resulta demasiado caro para competir con los combustibles fósiles. Por ello, seguiremos atentos a las innovaciones que puedan reducir los costes de producción o que ayuden a sufragarlos, ya sea mediante el descubrimiento de coproductos más competitivos u otras mejoras.

Pero el cultivo solo constituye uno de los retos a los que se enfrenta la producción a gran escala de algas para biocombustibles. Recolectar las células y eliminar el agua para facilitar la



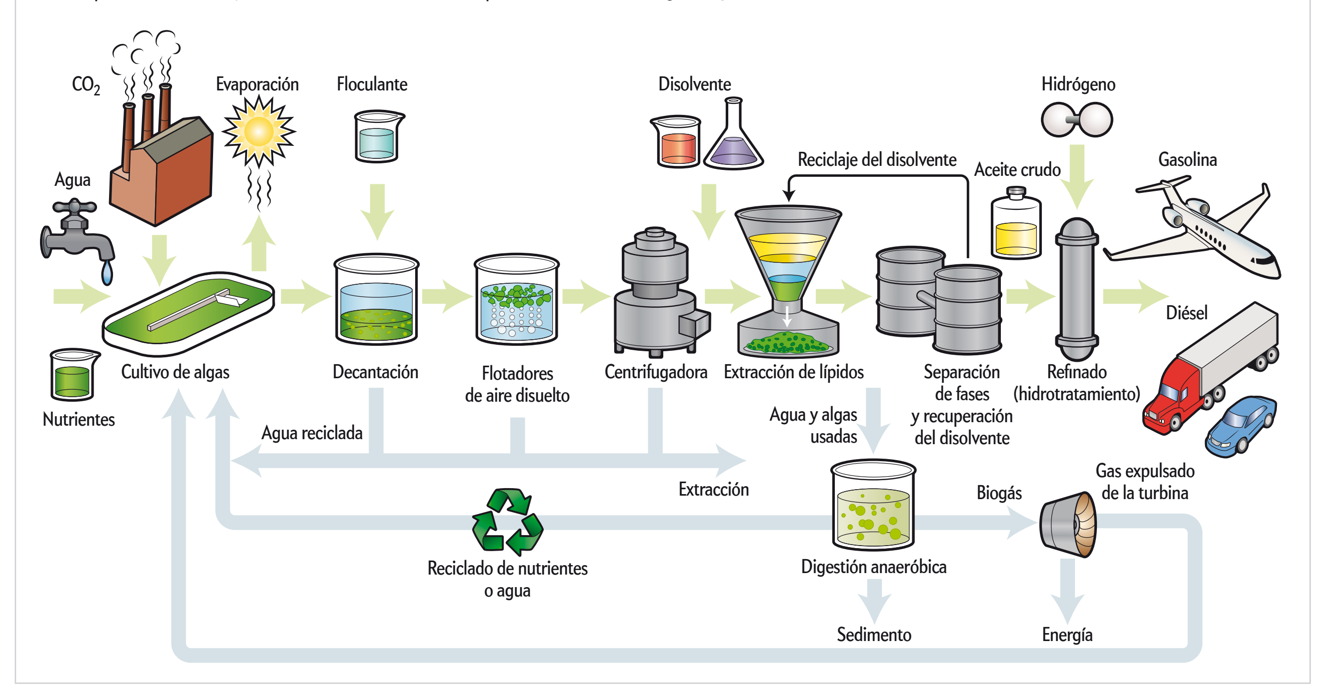
La Universidad de Arizona investiga varios sistemas de cultivo de algas: en estanques abiertos, fotobiorreactores tubulares y fotobiorreactores de panel plano (*en la imagen*). Los cambios en el color del cultivo indican variedades distintas o bien una misma cepa criada bajo condiciones diferentes.

CORTESÍA DE QIANG HU, UNIVERSIDAD DE ARIZONA

MODELOS DE PRODUCCIÓN

Del estanque al motor

El esquema representa el sistema de biorrefinería de algas que el NREL ha empleado para sus modelos. Las algas crecen en estanques abiertos donde reciben agua, nutrientes inorgánicos, dióxido de carbono y luz solar. Las células se recogen mediante floculación y flotadores de aire disuelto; después se concentran por centrifugación. El agua recuperada se recicla en su mayoría, pero una fracción se desecha para evitar la concentración de sales y otros residuos del cultivo. Los disolventes que extraen los lípidos con los que se fabricará el combustible pueden reutilizarse. La biomasa sobrante se convierte en biogás por digestión anaeróbica, el cual propulsa las turbinas que generan energía para la biorrefinería. Los sedimentos que quedan en el biodigestor se reutilizan como nutrientes para los estanques. Un reciclaje exhaustivo es necesario para reducir costes y asegurar la sostenibilidad.



extracción de los TAG plantea sus propios obstáculos. Aun en condiciones de crecimiento ideales, no resulta nada fácil conseguir más de 1 o 2 gramos de biomasa por litro de cultivo (compárese con los procesos de fermentación aeróbica con cepas bacterianas industriales, como *E. coli*, de los cuales pueden obtenerse hasta 100 gramos por litro). La baja densidad de biomasa de algas requiere una concentración cien veces mayor para lograr un proceso de extracción eficiente. Ello puede lograrse fácilmente por medio de la centrifugación; sin embargo, se trata de un proceso caro y que consume demasiada energía. Otros métodos procedentes de la industria de tratamiento de aguas residuales, como la floculación y los flotadores de aire disuelto, resultan mucho más económicos. La floculación utiliza iones inorgánicos o polímeros orgánicos (en algunos casos, aprovecha las propiedades de la membrana celular del alga) para conseguir que las células se agrupen. Después, esos grumos se recogen por simple decantación, o bien son arrastrados hacia la superficie por burbujas de aire u otros gases (flotadores de aire disuelto). Aunque ambos métodos resultan más económicos que la centrifugación, requieren modificaciones para según qué cepas y solo logran una fracción de la concentración que se alcanza con la primera.

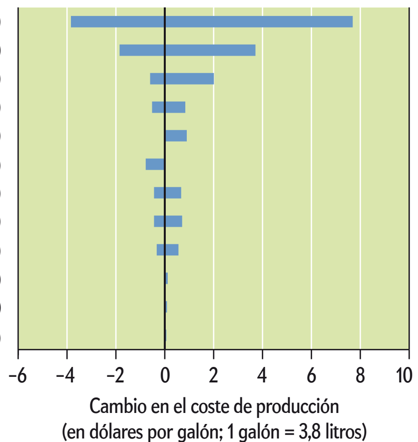
Una vez concentradas las algas, aún han de extraerse los lípidos. Los aceites de origen vegetal pueden separarse exprimiendo las semillas, pero las células de algas son demasiado pequeñas y duras. La extracción por disolventes de hexano resulta efectiva con semillas oleaginosas, como las de soja, pero el hexano no atraviesa con facilidad la pared celular de las algas. A menudo se necesitan etapas adicionales, como la sonicación u homogeneización mecánica, para romper la pared de la célula y facilitar el acceso a los lípidos. Esas operaciones incrementan el coste total y el consumo energético del proceso, por lo que se siguen investigando procesos alternativos.

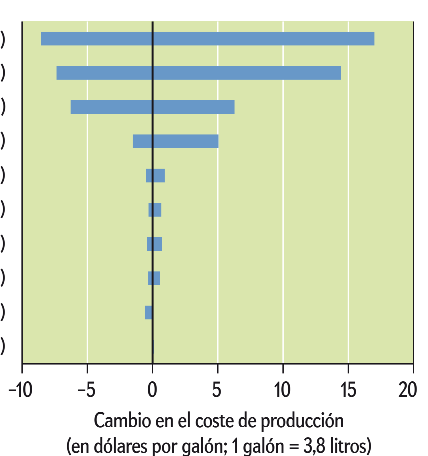
Aunque el componente esencial para la producción de biocombustible de algas son los lípidos, los carbohidratos y las proteínas podrían emplearse como materia prima de otros productos energéticos. Resulta posible producir metano por digestión anaeróbica y obtener otros biocombustibles mediante procesos catalíticos y de fermentación. Con estas posibilidades en mente, el NREL está desarrollando un programa para cuantificar con exactitud la cantidad de carbohidratos y proteínas presentes en la biomasa de algas.

CUESTIONES ECONÓMICAS

Todos los inconvenientes técnicos descritos hasta ahora han sido superados en mayor o menor medida en el laboratorio o en instalaciones piloto. Sin embargo, la viabilidad comercial de los combustibles derivados de algas debe aún vencer un obstáculo fundamental: el precio final del combustible debe poder competir con el de los derivados del petróleo. A lo largo de los últimos 20 o 30 años, las predicciones de coste han variado desde un optimismo candoroso (menos de 0,25 dólares por litro) hasta el conservadurismo más desesperanzador (más de 10 dólares por litro). Con todo, hasta que no se conozcan los costes reales

Los diagramas de tornado permiten evaluar el impacto de los parámetros de producción sobre los costes del biocombustible. Si la riqueza en lípidos aumentara del 25 al 50 por ciento en células criadas en estanques abiertos, el coste de producción se reduciría en 4 dólares por galón (0,80 euros por litro). El precio aumentaría en unos 8 dólares por galón (1,6 euros por litro) si la proporción de lípidos bajase del 25 al 12,5 por ciento. Estas modificaciones en el contenido de lípidos producirían la misma variación porcentual en el caso de células cultivadas en fotobiorreactores, aunque la cifra final es más elevada debido al mayor coste de esta técnica.





AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE

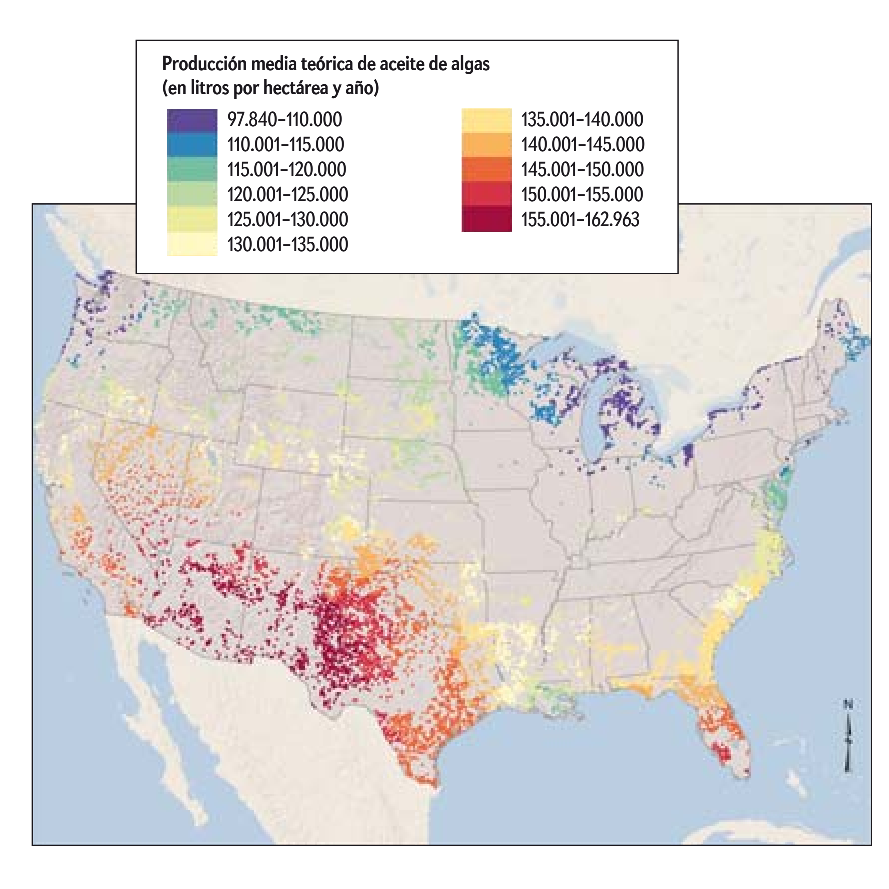
de producción, será difícil evaluar el ahorro que puede comportar la investigación y el desarrollo de nuevas técnicas. En consecuencia, el NREL planea establecer unos costes de referencia para la producción de combustible de algas con los medios técnicos disponibles hoy en día.

En tal empeño nos valemos de la experiencia y los métodos que se han aplicado al análisis tecnoeconómico de la producción de biocombustibles a partir de materias primas leñosas. Hemos modelizado los procesos básicos de tratamiento de algas tanto en estanques abiertos como en fotobiorreactores cerrados, incluyendo las fases de cultivo, recolección, concentración, extracción y recuperación de lípidos, así como su conversión final en combustible. Los modelos actuales presuponen que la biomasa consumida se someterá a un proceso de digestión anaeróbica que posibilitará recuperar, en forma de metano, parte de la energía invertida. Esta clase de estudios permitirá también explorar coproductos alternativos. Las tasas de flujo de material y energía calculadas a partir de estos modelos servirán para determinar el tamaño del equipo y deducir los costes de capital y de explotación de la biorrefinería de algas. Los cálculos parten de la premisa de que el aceite se empleará en la producción de diésel o combustible para reactores.

Según nuestro último análisis publicado, una refinería podría producir cerca de 40 millones de litros de combustible al año a un precio de entre 3 y 6 dólares por litro. Aunque en esa cifra influyen una gran variedad de factores, hemos identificado dos de ellos que revisten una importancia clave: el contenido en lípidos y la tasa de crecimiento. Si se incrementasen estos parámetros y se obtuviesen coproductos más rentables, los costes se reducirían de manera notable. Estos modelos admiten aún un margen de mejora si se incorporan más datos experimentales, tomados de las operaciones piloto en curso. También deben verificarse los supuestos relativos al reciclaje de nutrientes y de agua, con el objetivo de reducir costes y mejorar la sostenibilidad del proceso.

La composición de la biomasa obtenida en el proceso influye de manera considerable en su rentabilidad. La proporción de carbohidratos y proteínas determina el destino de la biomasa residual una vez extraídos los lípidos. Ello podría afectar considerablemente a todo el proceso, al promover el desarrollo de otros usos de la biomasa. Por ejemplo, una biomasa con una proporción elevada de azúcar fermentable podría emplearse como materia prima para producir etanol, de mayor valor comercial que el metano.

Un problema que aún debe abordarse radica en el amplio margen de valores que las publicaciones atribuyen a la proporción de lípidos en las algas. En parte, ello se debe a la gran variedad de métodos de extracción y tipos de disolvente. Aquí intervienen la falta de un proceso normalizado para la cuantificación de lípidos, las diferencias de compatibilidad en la polaridad de los disolventes, las distintas polaridades de los lípidos y la facilidad con la que los primeros pueden penetrar en los segundos. Además, el aceite extraíble siempre incluirá una fracción de sustancias que no podrán aprovecharse como combustible (clorofila y otros pigmentos, proteínas o carbohidratos hidrófobos), por lo que todo intento de mejorar la productividad del proceso deberá cuantificar con acierto dicha proporción. Hemos de asegurarnos de que cualquier aumento observado en la cantidad de lípidos extraídos no se deba a sesgos del proceso de medición. En este contexto, la investigación está dejando de lado la cuantificación basada en la cantidad de lípidos extraídos y, en su lugar, se orienta hacia el estudio de los procesos de transesterificación de toda la biomasa, lo que permite calcular con exactitud la proporción de combustible que puede obtenerse.



El cultivo de algas a gran escala requerirá evaluar los recursos hídricos disponibles. El mapa refleja el nivel máximo estimado de producción anual de algas para extracción de aceite en varias regiones estadounidenses. Estos valores teóricos se han calculado suponiendo una conversión perfecta de la energía solar en biomasa de algas, por lo que se consideran inalcanzables. Con las técnicas actuales, los valores medios de producción de algas rondan el 3,5 por ciento de dicho máximo teórico. Según este modelo, la producción máxima de aceite se alcanzaría en el sudoeste del país.

SOSTENIBILIDAD

Además de rentable, la elaboración de un biocombustible debe ser sostenible. Una medida del impacto ambiental de un combustible nos la proporciona la cantidad de dióxido de carbono que libera por unidad de energía. En el caso de los biocombustibles, esta suele expresarse con relación a las emisiones de la gasolina u otro combustible fósil. Además, han de tenerse en cuenta factores adicionales, como el uso de tierra (en particular, si esta se sustrae a la producción de alimentos o provoca deforestación) y el empleo de nutrientes, como nitrógeno u otros. Ello reviste particular importancia en el caso del fósforo, que no se considera abundante, por lo que su empleo para el cultivo de algas podría afectar a la producción de alimentos. También ha de considerarse la cantidad de agua necesaria, sobre todo si se trata de agua dulce y se deja evaporar en estanques abiertos. Por último, la producción del biocombustible siempre debe consumir menos energía que la que este podrá generar.

Aunque todos esos requisitos puedan parecer obvios, cuantificarlos con tino constituye una tarea muy ardua, como bien ilustra el irresoluto debate sobre el etanol de maíz. La dificultad se acentúa en el caso de los biocombustibles de algas, ya que numerosos parámetros en los que se basan los cálculos solo proceden de estimaciones o hipótesis. Hasta hoy, solo se han realizado algunos análisis de ciclo de vida, con resultados poco alentadores en cuanto al rendimiento energético y las emisiones de gases de efecto invernadero. Obtener una evaluación correcta de la sostenibilidad del proceso reviste una importancia fundamental. Las enormes inversiones en investigación, desarrollo e implantación solo pueden justificarse si existe la certeza de que los biocombustibles de algas aventajarán a los derivados del petróleo a los que algún día pretenden reemplazar.

Los biocombustibles derivados de algas han sido objeto de críticas debido a los grandes desafíos técnicos que presentan y porque su comercialización no llegará antes de cinco o diez años. No obstante, se están logrando mejoras notables en todos los frentes antes descritos: biología, cultivo, recolección, extracción y análisis. Los modelos tecnoeconómicos han progresado y disponemos de más datos para evaluarlos. Las mejores estimaciones de coste a nuestro alcance, aun siendo elevadas, han ganado en precisión y utilidad. Los modelos reducen la incertidumbre y cuantifican el riesgo, lo cual alimenta la confianza de los inversores en el éxito de la comercialización y ya ha contribuido a que los sectores público y privado destinen más recursos para encarar los obstáculos técnicos. Aunque el camino hacia la comercialización pueda resultar largo y consuma millones de dólares, consideramos que las microalgas muestran un gran potencial para reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles, recortar las emisiones de CO_2 y conseguir una energía más segura. Confiamos en que las barreras terminarán por caer.

PARA SABER MÁS

Placing microalgae on the biofuels priority list: A review of the technological challenges. H. C. Greenwell et al. en *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 7, pág. 46, 2009.

Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks. A. F. Clarens, E. P. Resurreccion, M. A. White y L. M. Coloso en *Environmental Science & Technology*, vol. 44, págs. 1813-1819, 2010.

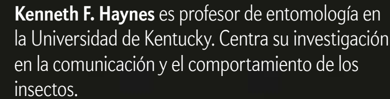
Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. R. Davis, A. Aden y P. T. Pienkos en *Applied Energy*, vol. 88, págs. 3524-3531, 2011.

Comparative cost analysis of algal oil production for biofuels. A. C. Sun et al. en *Energy*, vol. 36, págs. 5169-5179, 2011.

Billion-ton update: Biomass supply for a bioenergy and bioproducts industry. Departamento de Energía de EE.UU., Laboratorio Nacional de Oak Ridge, 2011.

MAPA PROCEDENTE DE: «NATIONAL MICROALGAE BIOFUEL PRODUCTION POTENTIAL AND RESOURCE DEMAND», POR MARK WIGMOSTA ET AL. EN *WATER RESOURCES RESEARCH*, 2011




Kenneth F. Haynes es profesor de entomología en la Universidad de Kentucky. Centra su investigación en la comunicación y el comportamiento de los insectos.



SALUD PÚBLICA

Durmiendo con su enemigo

Vuelven las chinches. ¿Qué puede hacer la ciencia para detenerlas?

Kenneth F. Haynes

Aquel anciano vivía solo en un apartamento barato a las afueras de Cincinnati. Pero en realidad no estaba solo. Al anochecer, las chinches surgían del destartalado colchón plegable para alimentarse de su sangre. A juzgar por los miles de insectos que encontré en la casa, me atrevería a decir que el problema venía de lejos. Prisionero de la pobreza y de una salud precaria, aquel hombre había nutrido generaciones de esos parásitos, soportando sus picaduras noche tras noche mientras se multiplicaban por doquier.

Tras desaparecer casi por completo durante medio siglo gracias al desarrollo del DDT y de otros plaguicidas de amplio espectro, la chinche, *Cimex lectularius*, está resurgiendo de manera inquietante y no solo en enclaves urbanos abarrotados. El parásito ha infestado por igual hoteles de lujo, residencias universitarias, comercios, edificios de oficinas, cines, hospitales y casas de ricos y pobres. Aunque consideradas una simple molestia por la mayoría, las chinches cobran un precio que va más allá de las molestas picaduras que dejan a su paso: en una encuesta realizada en 2010 entre más de 400 inquilinos de viviendas invadidas por las chinches, el 31 por ciento refirió otros síntomas, que iban desde insomnio a depresión, y que atribuían a esas molestas intrusas. Y un estudio publicado en 2011 reveló la presencia en chinches de *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM, una bacteria que causa graves lesiones en la piel), aunque es necesario seguir investigando para averiguar si las chinches contribuyen a su propagación. Estos insectos también causan pérdidas económicas sustanciosas, como cuando un hotel debe cerrar temporalmente habitaciones para combatir una plaga. En un edificio de viviendas de titularidad pública en Ohio se invirtieron unos 500.000 dólares en el control de las chinches; no zanjaron el problema hasta

CORTESÍA DE GRAHAM SNODGRASS, COMANDO DE SALUD PÚBLICA DEL EJÉRCITO DE EE.UU.

que, después de probar otros sistemas menos drásticos, optaron por la fumigación del edificio entero.

Para derrotar a esos compañeros indeseables, los científicos se han esforzado en averiguar cómo han podido volver a proliferar. Parece ser que las chinches se han beneficiado de lo que mi colaborador de la Universidad de Kentucky Michael Potter ha calificado como una concurrencia perfecta de acontecimientos, entre ellos la aparición de genes de resistencia a insecticidas, cambios en las tácticas de control de otras plagas urbanas y cambios en los patrones de los viajes internacionales y de los movimientos migratorios humanos. La buena noticia es que estudios recientes proponen nuevas estrategias para detectar poblaciones incipientes de insectos hematófagos antes de que se conviertan en una plaga, y estos estudios han revelado aspectos de la biología de la chinche sobre los cuales podría intervenirse.

BUENAS NOCHES Y QUE DUERMAS BIEN

Entender cómo se han convertido las chinches en una plaga para las personas requiere un conocimiento básico de la biología de estos insectos. Las chinches se sienten atraídas por el calor y el dióxido de carbono que desprenden los humanos, y quizá también por los olores corporales. Viven agrupadas en las camas y a su alrededor; durante el día permanecen escondidas en huecos y rincones hasta que cae la noche, momento en que salen de sus escondrijos para alimentarse a costa de sus anfitriones mientras duermen. Una hembra adulta pone unos dos huevos por día cuando dispone de acceso regular a su ración de sangre; se estima que a lo largo de su vida pone un promedio de 150 a 500 huevos. En ciertas condiciones, pueden llegar a resistir seis meses o más sin probar bocado. Además, se propagan con facilidad, desplazándose rápidamente de una habitación a otra encaramadas a la ropa, los zapatos y otras pertenencias de la gente.

La lucha de la humanidad contra las chinches viene de antiguo. Se han recuperado restos de estos parásitos que se remontan a hace 3500 años, en tiempo de los faraones. Sin embargo, las raíces de esa relación son mucho más profundas. Algunos expertos afirman que los antepasados de las chinches eran parásitos de los murciélagos. Se supone que pasaron a los humanos cuando estos empezaron a vivir en cuevas. La relación entre nuestros ancestros y las chinches se perpetuó cuando abandonamos nuestra vida nómada en favor de asentamientos permanentes. No obstante, en latitudes templadas, la llegada del invierno mantenía las plagas a raya. Debido a su sensibilidad al frío, las poblaciones de chinches, que proliferaban durante los meses más calurosos, menguaban durante los más fríos.

Antes de la invención de los plaguicidas se recurría a cualquier solución imaginable para reducir su número, arriesgándose a veces con medidas peligrosas que la sociedad moderna no permitiría. Por ejemplo, un manual para el control de alimañas de 1777 recomendaba quemar pólvora en las rendijas alrededor de la cama —no estoy seguro de si esta solución era una manera de vengarse de las chinches o si tenía valor práctico—. Otro método consistía en aplicar las plantas apropiadas, concretamente eléboro y ajenjo, hervidas con la «cantidad de orina adecuada». Se decía que eso también iba bien, pero ¿no sería que forzaba al ocupante de la cama a buscar otro lugar para dormir? También se utilizaron, con poco éxito, arsénico, cianuro y otras sustancias peligrosas. Lo más normal era que la gente abordase el problema limpiando a fondo sus hogares, rociando el armazón de la cama con agua hirviendo y queroseno y deshaciéndose de los colchones de paja infestados. Eso resolvía el problema por un tiempo.

Cuando los edificios de viviendas incorporaron los sistemas de calefacción central en Europa y EE.UU., a principios del siglo xx, las chinches comenzaron a poblar las casas durante todo el año. La aparición del DDT en la década de los cuarenta supuso por fin la ansiada solución. Este insecticida, que empezó a usarse durante la Segunda Guerra Mundial para proteger a los soldados estadounidenses de mosquitos y piojos, demostró ser también un excelente matachinches. Su prolongada eficacia significaba que, a diferencia de otros productos, bastaba con una sola aplicación. En pocos años, las plagas prácticamente desaparecieron de América del Norte, Europa occidental y otros países desarrollados. Por desgracia, el DDT y otras sustancias químicas parecidas también estuvieron a punto de acabar con algunas aves rapaces, además de ocasionar otros graves problemas ambientales. En 1972 fueron retirados del mercado en Estados Unidos.

Sin embargo, incluso sin DDT, las chinches no reaparecieron hasta alrededor del año 2000. Los expertos han propuesto diversas razones para explicar su regreso. Algunos han aducido que el aumento de los viajes internacionales a regiones donde nunca llegaron a desaparecer ha permitido que reaparezcan en zonas donde habían sido erradicadas, aunque su brusco resurgimiento no coincide con ningún cambio importante en la frecuencia de los desplazamientos. Un factor más influyente puede haber sido la desaparición de las barreras políticas que restringían los viajes entre Oriente y Occidente, junto con el aumento de la movilidad de las poblaciones dentro de cada país.

El progresivo abandono de los insecticidas de amplio espectro por cebos y pulverizadores específicos, más eficaces y centrados en cucarachas, hormigas y otras plagas urbanas, podría haber favorecido que las chinches reconquistaran el terreno perdido. Incluso la coexistencia de riqueza y pobreza en muchos pueblos y ciudades puede contribuir a su propagación: es probable que un sofá con buen aspecto abandonado en la acera porque está infestado de chinches vaya a parar a un hogar de alguien con necesidades. La resistencia a los insecticidas también ha contribuido al problema: las chinches fueron de los primeros insectos que desarrollaron resistencia al DDT; los primeros casos se dieron en Pearl Harbor poco después de la Segunda Guerra Mundial. (En realidad, aunque algunos exterminadores de plagas abogan por el retorno del DDT al dormitorio, hoy en día las chinches probablemente resistirían sus efectos.) Y poblaciones de todo el mundo han desarrollado resistencia a los insecticidas que reemplazaron el DDT. El conjunto de estos factores, combinado con el estigma social que acarrean (hecho que retrasa su tratamiento) puede explicar la actual pandemia de estos insectos.

Con miles de años de tenaz resistencia ante el hombre, las chinches constituyen enemigos temibles. Pero los investigadores

EN SÍNTESIS

Después de una tregua de varios decenios, las chinches han regresado vengativas, infestando a ricos y pobres por igual.

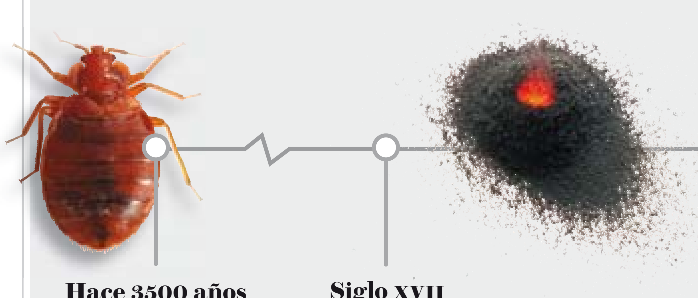
La concurrencia de factores que van desde la aparición de resistencia a los insecticidas a los cambios en los patrones de los viajes internacionales parece haber facilitado el regreso del parásito.

En fecha reciente se han descubierto varios aspectos de la biología y la conducta de las chinches que pueden ayudar a diseñar nuevos métodos de detección y erradicación.

CONTEXTO

Breve historia de las chinches

Las chinches han sido una plaga para la especie humana durante miles de años, lo que ha llevado a la aplicación de métodos de erradicación tan peligrosos como ineficaces. Tras unas décadas de tregua gracias al DDT y a otros plaguicidas similares, las chinches vuelven a irrumpir por doquier.



Hace 3500 años
Pruebas arqueológicas más antiguas de la presencia de chinches

Siglo XVII
Se recomienda la pólvora para combatir las chinches

Principios del siglo XX
La difusión de la calefacción central favorece la presencia de chinches durante todo el año

Años cuarenta
Con la aparición del DDT, por fin se encuentra una solución contra las chinches

1972
El DDT es eliminado del mercado debido a los problemas ambientales

2000
Las chinches reaparecen

ALEX WILD, CORBIS (*chinche*); DAVE KING, GETTY IMAGES (*pólvora*); CORBIS (*DDT*)

les están ganando la batalla. Una prioridad es la identificación de mejores medios para erradicarlas desde el principio. Pequeñas y esquivas como se muestran durante el día, resultan difíciles de localizar y cazar. Resulta fundamental detectar con certeza su presencia y verificar su erradicación después del tratamiento. Uno de los dispositivos de detección más sencillos que ha hecho furor en el mercado es el atrapainsectos *ClimbUp*. Consiste en un recipiente poco profundo dotado de un foso (en pocas palabras, dos recipientes de plástico redondos y concéntricos soldados en una sola pieza) diseñado para colocar bajo la pata de una cama. La trampa delata el origen de los insectos: si caen en el pozo interior, las chinches proceden de la cama; pero si quedan atrapadas en el pozo exterior, tienen que haber llegado ahí desde otro rincón de la habitación. Pese a ello, cabe la posibilidad de que un dispositivo de este tipo no detecte una población pequeña u otra que permanezca oculta en la cabecera del lecho.

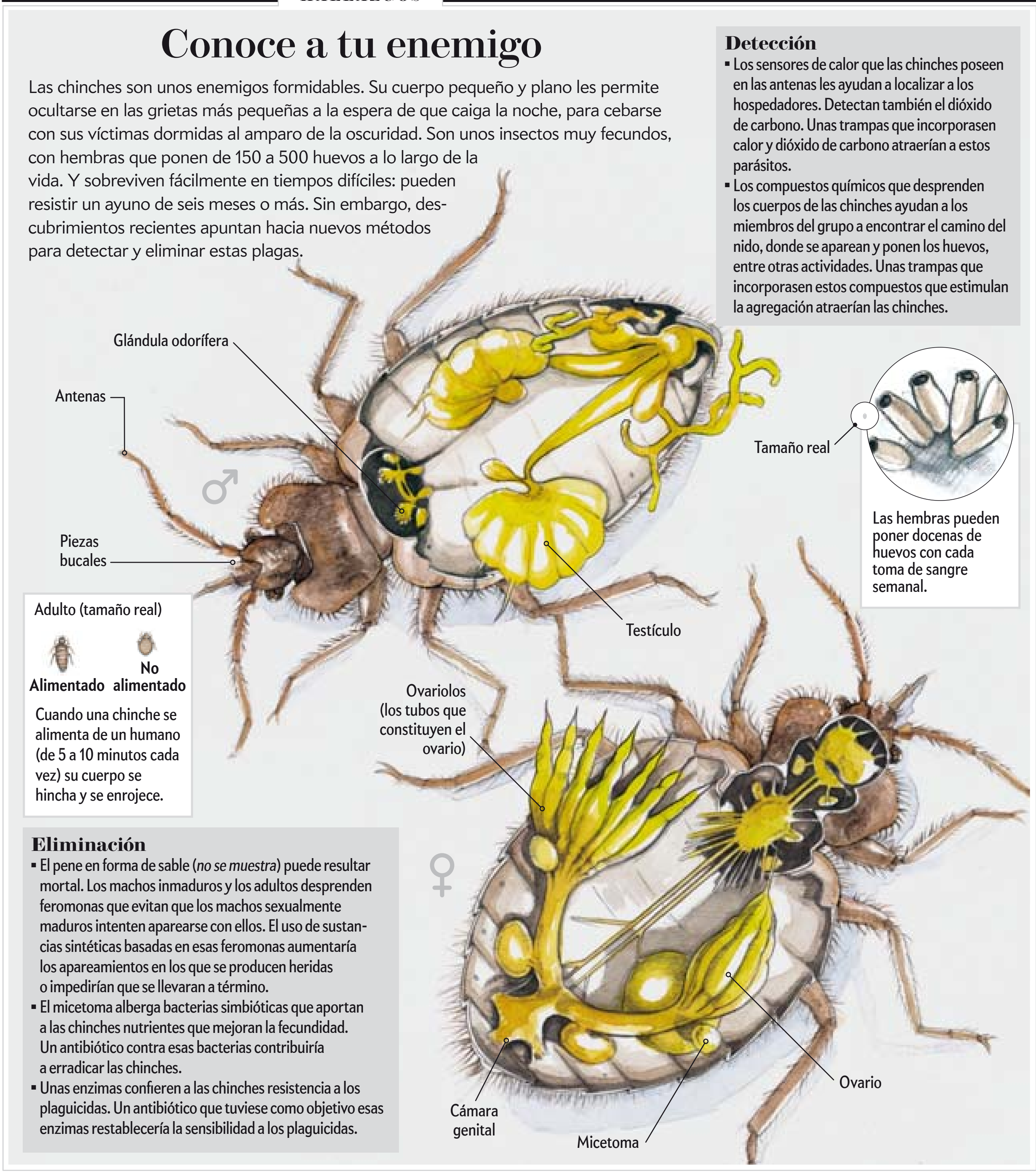
Otro nuevo tipo de detector se basa en aprovechar los mecanismos que emplean las chinches para localizar hospedadores humanos. El mercado ofrece ahora unas trampas que emiten calor y dióxido de carbono, junto con otros atrayentes no revelados. También resulta bastante eficaz una trampa casera preparada con una escudilla de las que se usan para la comida de los gatos. Se coloca invertida y, a modo de cebo, se pone dióxido de carbono en forma de hielo seco, que se va sublimando lentamente. Con todo, como la trampa de doble pozo, estas otras no siempre revelan la existencia de chinches en las primeras fases de la invasión, cuando sería más fácil acabar con ellas.

Hoy por hoy, nada mejor que un perro entrenado cuando se trata de descubrir grupos pequeños y dispersos de chinches. No se sabe qué es lo que husmea el can, pero podrían ser las sustancias que investigadores de la Universidad Simon Fraser identificaron en 2008 como componentes de las señales químicas que llaman a las chinches a agruparse. Aparte de la alimentación, todas las actividades de una chinche (apareamiento, puesta de huevos, desarrollo de las formas inmaduras, etcétera) transcurren en lugares ocultos que marcan con sus heces y con sustancias volátiles que emanan de su cuerpo. Estas señales ayudan a las otras chinches de la colonia a encontrar el camino de regreso al nido. La tendencia a agruparse seguramente beneficia a todos los individuos, quizá porque aumenta la humedad de su microhábitat. Si pudiéramos imitar esas señales de agregación, podríamos desarrollar una trampa que permitiera detectar su presencia. Una trampa tal, que pudiese pasar inadvertida, interesaría sin duda a los hoteles que buscan controlar discretamente la presencia de chinches en las habitaciones.

EXTRAÑOS COMPAÑEROS DE CAMA

Por supuesto, la detección de las chinches es solo el primer paso. Erradicarlas resulta mucho más difícil. Después de una cuidadosa inspección, los exterminadores suelen utilizar recubrimientos para el colchón y los somieres que impiden la fuga de las chinches ocupantes. Entonces pueden ser aspiradas, congeladas, o se les puede aplicar vapor o un insecticida de acción rápida para eliminar las que estén a la vista. También se pueden esparcir polvos insecticidas o secantes en los huecos de la pared para matar las que se arrastran por esos espacios y rociar insecticidas con actividad residual, que siguen matando las que merodean por las superficies tratadas durante días, semanas o meses. Pero, para exterminarlas, incluso con los insecticidas más eficaces en manos de los profesionales más expertos, suelen ser necesarias varias aplicaciones en el transcurso de unas semanas. Esos insecticidas, disponibles solo para profesionales autorizados, deben utilizarse según unas normas estrictas diseñadas para proteger la salud humana y el ambiente. Los insecticidas disponibles en el mercado pueden resultar peligrosos si se utilizan mal y a menudo son ineficaces. En cambio, calentar la habitación o la casa hasta 50 ºC con un equipo profesional durante cuatro horas es un método inocuo que ha cosechado un gran éxito. Con la excepción del tratamiento térmico y de la fumigación integral del edificio, deshacerse de las chinches exige el uso de múltiples tácticas orquestadas con precaución.

Naturalmente, necesitamos nuevas formas de eliminar las chinches cuando las encontremos. Para ello, científicos de todo el mundo han ido observando de cerca el comportamiento tan especial de apareamiento de estos insectos en busca de posibles pistas. Este se caracteriza por su truculencia. Los machos blanden un pene en forma de sable que usan para perforar la capa externa o cutícula del abdomen de la hembra: una forma de apa-



reamiento llamada, de manera muy descriptiva, inseminación traumática. Las hembras presentan adaptaciones a estas cópulas lesivas: una escotadura en forma de V en el abdomen, la espermatolega, encauza la penetración para atenuar el efecto traumático. Una vez dentro del cuerpo de la hembra, el esperma y cualquier patógeno que haya arrastrado consigo tropiezan con una barrera de células sanguíneas que forman un órgano poco organizado cuya función se supone inmunitaria: la mesoespermatolega. El esperma migra a través de ella hasta una zona de almacenamiento cercana a cada ovario. A pesar de tales adaptaciones, en las colonias de chinches de mi laboratorio acaban predominando los machos debido a las lesiones que sufren las hembras en las reiteradas cópulas. Sin intervención humana, esas colonias se extinguirían.

En el mundo real, las chinches sobreviven porque probablemente las hembras se dispersan para escapar de esas cópulas hirientes. Cabe preguntarse por qué han seguido esa senda, costosa en términos evolutivos, mientras que las hembras de millones de otras especies de insectos disponen de aberturas reproductoras que los machos utilizan para inseminarlas sin cau-

MIKE SUDAL

sarles lesiones. Mis colaboradores y yo estamos estudiando si esta conducta de apareamiento constituye un punto vulnerable.

Estudios publicados en 2009 y 2010 por Rickard Ignell, de la Universidad sueca de Ciencias Agrícolas en Alnarp, y sus colaboradores, y por Camilla Ryne, de la Universidad de Lund, han demostrado otra adaptación intrigante de las chinches a la inseminación traumática, que podría resultar útil para los humanos. Los machos no hacen distingos en sus primeros encuentros sexuales: se abalanzan tanto sobre otros machos adultos como sobre hembras o machos inmaduros de gran tamaño. Estos encuentros podrían causar lesiones mortales a los machos penetrados porque carecen de las referidas adaptaciones femeninas para soportar las estocadas. Los investigadores descubrieron que, con el fin de evitar estos peligrosos envites, las ninfas y los machos adultos liberan feromonas para avisar al desenfrenado galán que está desperdiciando su tiempo y su semen. No es difícil imaginar la manipulación de estas respuestas innatas a nuestro favor. En teoría, la aplicación de feromonas sintéticas en los nidos de chinches desalentaría por completo el apareamiento o, si las chinches se acostumbrasen al olor, fomentaría los lesivos malentendidos sexuales como los que causan la decadencia en las chinches de laboratorio.

Hay otro aspecto de la reproducción de las chinches que merece ser mencionado. Como la mayoría de los animales que se reproducen sexualmente, el macho posee un par de testículos que fabrican espermatozoides y sendos conductos deferentes, que durante la cópula transfieren a la hembra los espermatozoides y líquidos accesorios; esta, en cambio, posee ovarios, donde se producen los óvulos, que luego son liberados a través de los oviductos. Las hembras también poseen un órgano llamado micetoma, que alberga bacterias simbióticas. Cuando Takema Fukatsu, del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzadas en Japón, y sus colaboradores intentaron averiguar qué pasaría con la viabilidad de las chinches si se les eliminaran las bacterias mediante antibióticos, observaron que la tasa de reproducción descendía en las hembras de la colonia desprovista de ellas. En cambio, si se añadía a su dieta de sangre un suplemento de vitamina B, estas recuperaban los valores de fecundidad, lo que indica que las bacterias del micetoma contribuyen a proporcionarles esos nutrientes.

A partir de esos hallazgos, podríamos pensar en la posibilidad de tratar al hospedador con antibióticos y así alcanzar indirectamente esas bacterias, lo que terminaría matando las chinches. Pero necesitamos una solución mucho más específica. El uso de antibióticos de amplio espectro para tratar a una persona que no está enferma podría acarrear múltiples problemas. En primer lugar, las bacterias beneficiosas de nuestro intestino podrían desaparecer y ser desplazadas por otras resistentes a los antibióticos, y algunas de esas bacterias serían patógenas o nos causarían carencias de ciertas vitaminas. Las bacterias del micetoma pueden ser un objetivo, pero necesitamos diseñar antibióticos muy específicos que afecten solo a ellas.

En cuanto al desarrollo de nuevos insecticidas, el futuro es incierto. En las últimas décadas, para controlar las chinches se ha dependido de insecticidas a base de piretroides. Ahora las chinches están desarrollando resistencia a este tipo de compuestos, lo que no es de extrañar, dado que los primeros informes de resistencia al DDT surgieron a finales de la década de los cuarenta del siglo xx. El DDT y los piretroides comparten un mecanismo de acción que a menudo se traduce en resistencia cruzada, es decir, el desarrollo de resistencia a uno de estos compuestos confiere resistencia al otro. Mis colaboradores y yo encontramos unas chinches en Cincinnati que resistían una dosis de deltametrina (un piretroide corriente) 10.000 veces superior a la dosis necesaria para matar a una cepa de chinches sensibles que no habían sido tratadas nunca con ese insecticida. Quedamos muy sorprendidos al verlas caminar como si nada por aquel montón de deltametrina casi pura y sobrevivir para alimentarse un día más, mientras que sus compañeras sensibles sucumbían cuando eran expuestas a trazas ínfimas de aquel mismo producto. Además, presentaban resistencia cruzada al DDT.

Esas chinches de Cincinnati sumamente resistentes no son únicas: mi equipo ha detectado genes de resistencia a insecticidas en más del 85 por ciento de las poblaciones de chinches que hemos muestreado por todo Estados Unidos. Nuestro laboratorio y otros están empezando a identificar los mecanismos de esa resistencia. Dos colegas de la Universidad de Kentucky, Fang Zhu y Subba Reddy Palli, han utilizado técnicas genéticas para restaurar la sensibilidad a insecticidas en cepas de chinches resistentes. Su trabajo sugiere que las enzimas que neutralizan la acción tóxica de los insecticidas en las cepas resistentes podrían ser un objetivo vulnerable. Del mismo modo, mi grupo de investigación ha descubierto que un compuesto que se sabe que aumenta la toxicidad del insecticida porque centra su efecto en ese complejo de enzimas hace que aquella población que resiste 10.000 veces más la deltametrina se vuelva sensible a dicho insecticida. La industria de control de plagas ya está utilizando formas comerciales de esta sustancia, el butóxido de piperonilo, para que las chinches vuelvan a adquirir un cierto grado de sensibilidad a los piretroides. Es posible que pronto se pueda identificar con rapidez el mecanismo de resistencia en cualquier población de chinches y se pueda diseñar una estrategia de erradicación a la carta, seleccionando en cada caso insecticidas y sustancias sinérgicas que serían efectivas para ese grupo.

Las chinches son una pesadilla, sobre todo para quienes no pueden permitirse medidas eficaces para combatirlas. Los exterminadores de plagas preparados pueden acabar con las infestaciones si combinan una inspección minuciosa con el uso responsable de los insecticidas disponibles y otras tácticas, pero resulta arduo y caro. Para los inquilinos y propietarios de viviendas, la mejor apuesta consiste en tomar medidas para evitar, en primer lugar, que las chinches entren en el edificio. Yo mismo, cuando regreso a casa de un lugar infestado de chinches, pongo mi ropa en la secadora a la temperatura más alta. También serviría dejar la maleta dentro de un coche durante un fin de semana de verano sofocante en vez de arriesgarme a que las chinches invadan mi hogar después de un viaje: una exposición prolongada a 50 ºC en la maleta acabará con ellas. En cambio, matarlas por congelación es una solución más difícil porque pueden sobrevivir muchas horas a las temperaturas que se alcanzan en los congeladores domésticos.

Es poco probable que las chinches vuelvan a ser cosa del pasado, pero si se educa a la población y se investigan sus puntos vulnerables, podemos frenar su avance. Lo primero que debemos hacer es dejar de considerar la presencia de chinches como un estigma social y afrontarla como un problema de salud pública.

PARA SABER MÁS

Insecticide resistance in the bed bug: A factor in the pest's sudden resurgence? A. Romero et al. en *Journal of Medical Entomology*, vol. 44, n.º 2, págs. 175-178, marzo 2007.

Nymphs of the common bed bug (*Cimex lectularius*) produce anti-aphrodisiac defence against conspecific males. Vincent Harraca et al. en *BMC Biology*, vol. 8, n.º 121, 2010.

The history of bed bug management —with lessons from the past. Michael F. Potter en *American Entomologist*, vol. 57, n.º 1, págs. 14-25, primavera 2011.

ATRAPAR EL

Si la energía renovable ha de constituir una solución de futuro, necesitamos sistemas que la almacenen para los momentos en los que no luzca el sol ni sople el viento

Davide Castelvecchi

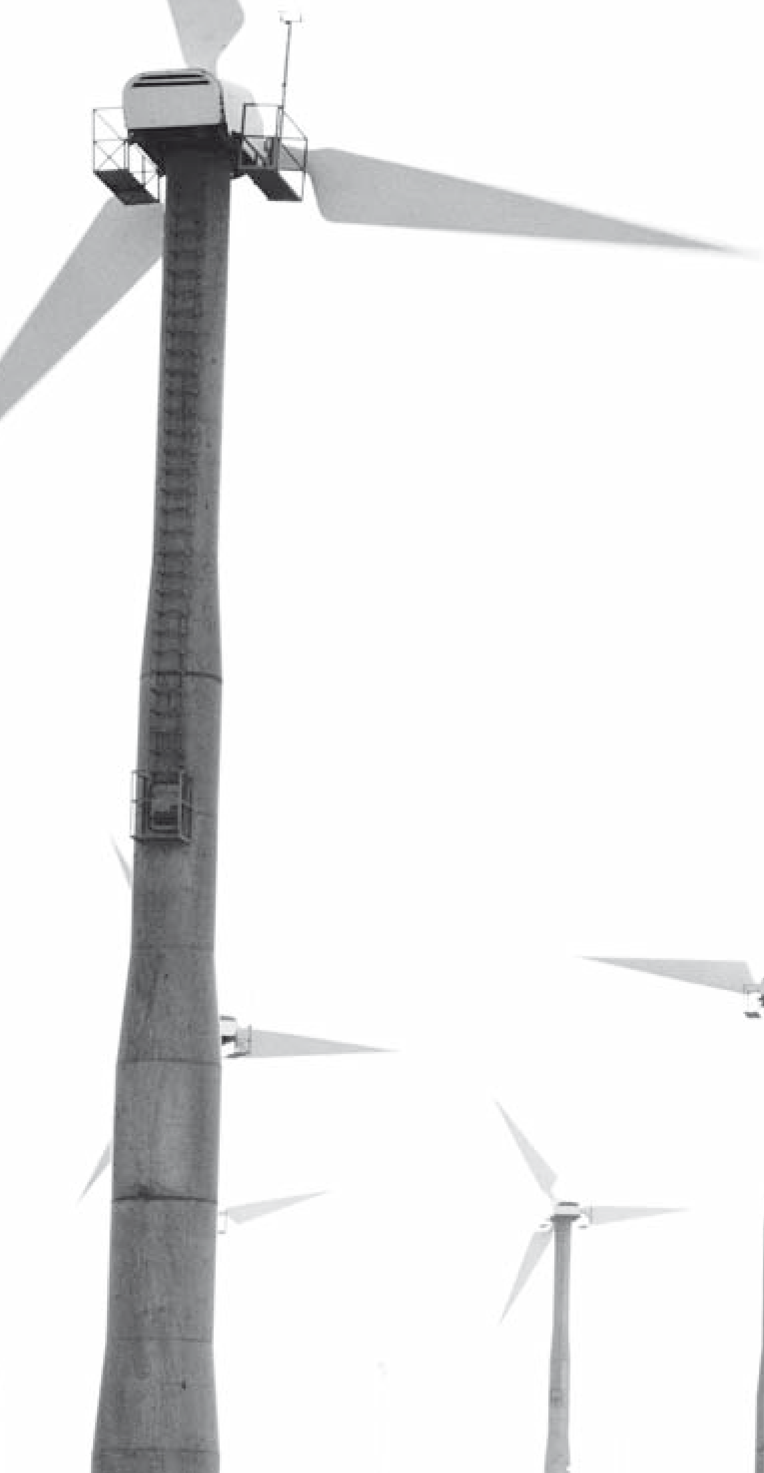
Si desea un ejemplo de las dificultades que aún debe superar la producción renovable de energía, fíjese en Dinamarca. El país posee algunas de las granjas eólicas más extensas del planeta. Sin embargo, dado que la demanda suele ser muy inferior a la energía producida en los momentos en los que el viento sopla con más fuerza, el país nórdico debe vender ese excedente a precio de saldo a los países vecinos... solo para volver a comprarlo a un importe muy superior cuando sobrevienen picos de demanda. Como consecuencia, las tarifas danesas se encuentran entre las más altas del mundo.

EN SÍNTESIS

El sol no siempre brilla y el viento no siempre sopla. Para generalizar el uso de estas fuentes de energía, necesitamos sistemas que permitan almacenar los excedentes de generación, a fin de cubrir el abastecimiento durante los momentos de carestía.

Algunas compañías ya emplean esos excedentes para bombear agua hacia embalses elevados; después, el agua que cae genera energía por medio de turbogeneradores. Existen alternativas para aplicar el hidrobombeo en una variedad de emplazamientos.

Otras propuestas comprenden instalaciones de aire comprimido, nuevas baterías más económicas, centrales termosolares o métodos eficientes de generación de hidrógeno. Para llegar a ser competitivos, estos métodos aún requieren mejoras.



VIENTO

Davide Castelvecchi
es redactor científico
y colaborador
de *Scientific American*.



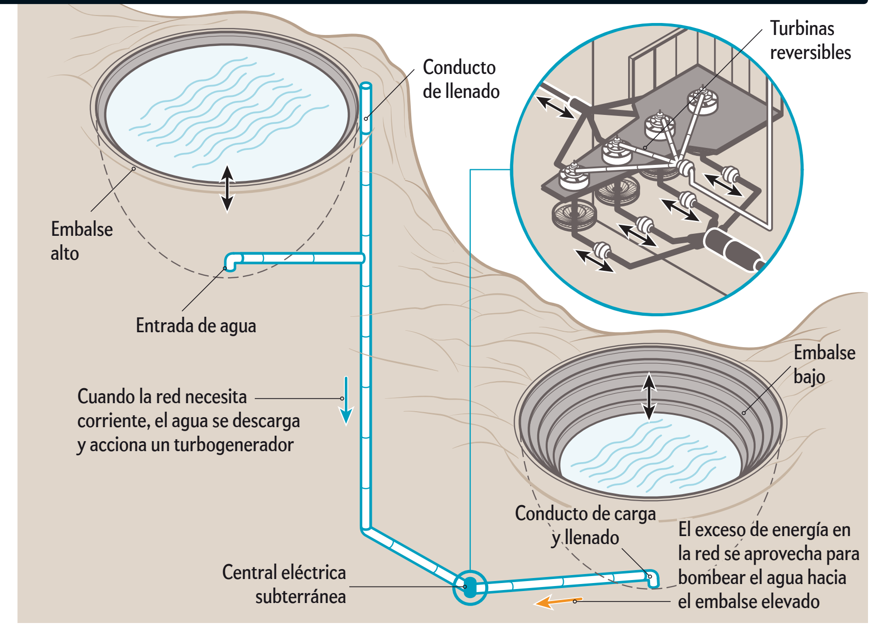
CHRISTOPHER GRIFFITH, ARCHIVO TRUNK

Las compañías eléctricas de Texas y California se enfrentan a un desajuste similar: en ocasiones, se ven obligadas a pagar a terceros para que admitan el excedente de energía procedente de sus centrales eólicas o solares. Sobre el papel, el viento y el sol bastan para cubrir las necesidades energéticas de EE.UU. y otros países. En la práctica, según el Departamento de Energía de EE.UU., ambas fuentes resultan demasiado erráticas para suministrar más del 20 por ciento del total. Pasado ese límite, equilibrar oferta y demanda se torna harto difícil. La solución pasa por hallar procedimientos baratos y eficientes que permitan almacenar la energía generada cuando el viento arrecia y el sol abrasa.

Los imanes superconductores, los supercondensadores o los volantes de inercia avanzados resultan demasiado caros, o bien son incapaces de almacenar energía durante períodos prolongados. A continuación presentamos cinco propuestas que podrían resolver el problema. Cada una de ellas posee el potencial de almacenar durante días la energía necesaria para abastecer a una metrópoli. Hemos pedido a un equipo de expertos que las califiquen según tres criterios: aplicabilidad a gran escala, rentabilidad económica de la construcción y rendimiento energético de la explotación.

Desde luego, ningún sistema de almacenamiento restituye toda la energía que se le ha suministrado, pero algunos resultan más eficientes que otros. Las dos primeras propuestas (el hidrobombeo y el aire comprimido) se encuentran bastante maduras y resultan económicamente viables. A las otras tres les falta un último toque, pero las recompensas podrían ser enormes.





Varios países ya emplean el hidrobombeo para almacenar cantidades considerables de energía (unos 20 gigavatios en EE.UU.). Esta técnica centenaria opera, en esencia, al revés que una central hidroeléctrica. El exceso de electricidad se emplea para bombear agua desde un embalse bajo hacia otro situado en una cota más alta. Cuando el agua se descarga desde arriba, acciona un turbogenerador. El rendimiento neto puede llegar al 80 por ciento.

En EE.UU. existen 38 centrales de hidrobombeo, las cuales pueden almacenar hasta del 2 por ciento de la potencia instalada en el país. Aunque inferior a la proporción alcanzada en Europa y Japón (5 y 10 por ciento, respectivamente), la industria planea construir embalses cerca de las centrales eléctricas ya existentes. «No necesitamos más que una diferencia de cotas y cierta cantidad de agua», explica Rick Miller, vicepresidente de la compañía HDR en Omaha.

Entre los planes más ambiciosos se cuenta el proyecto Almacenamiento por Bombeo de Mountain Eagle, en California. Se excavarían dos embalses aprovechando una antigua mina de hierro a cielo abierto, donde se almacenaría la energía procedente de las granjas eólicas y solares de la región. Su potencia podría ascender a 1,2 gigavatios: tanto como la de una central nuclear de buen tamaño. En Montana, el proyecto de almacenamiento por hidrobombeo propuesto por Grassland Renewable Energy acumularía la energía eólica de las Grandes Llanuras en un lago artificial que se construiría sobre la cima de una meseta, con un desnivel de 400 metros.

La expansión del hidrobombeo se halla limitada por la topografía. La técnica requiere inundar extensas cuencas elevadas, con posibles daños al ecosistema. Además, países como Dinamarca o Países Bajos carecen de accidentes geográficos. Para tales casos, la consultora energética holandesa Kema ha propuesto una «isla de energía»: una especie de gran piscina artificial en medio del mar (en una zona de poca profundidad), rodeada por un dique fabricado con materiales de desecho. Con el excedente de electricidad se bombearía agua desde la piscina hacia el mar circundante. Después, esa energía se recuperaría cuando el mar volviese a inundar la cavidad a través de unos túneles abiertos en el dique y con turbinas instaladas en su interior. Así, el mar haría las veces de embalse elevado.

Por último, la propuesta de la compañía Gravity Power podría aplicarse casi en cualquier lugar: se excavaría un pozo en cuyo interior descansaría un cilindro muy pesado, del mismo diámetro que el agujero. La energía sobrante se emplearía en inyectar agua desde abajo, lo que haría ascender el cilindro. Para recuperarla, en la base se abrirían túneles por los que, empujada por el cilindro, correría el agua y accionaría las turbinas.

EXPERTOS

Imre Guyk
Departamento de Energía de EE.UU.

Ruth Howes
Universidad de Ball

Haresh Kamath
Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica

David J.C. MacKay
Universidad de Cambridge

Ernest Moniz
Instituto de Tecnología de Massachusetts

JAMESON SIMPSON (*ilustraciones*)

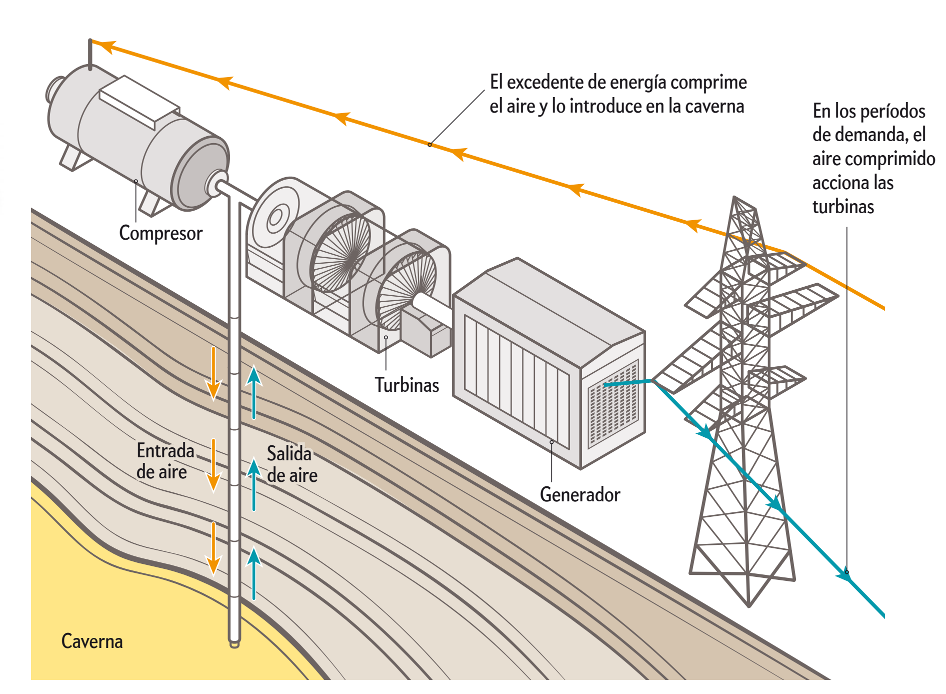


En Alabama, a muchos metros de profundidad, una caverna del tamaño de medio Empire State contiene lo que podría suponer la solución más rápida a las necesidades mundiales de almacenamiento de energía: aire. Cuando la producción de electricidad supera a la demanda, un conjunto de bombas eléctricas instaladas en la superficie inyectan aire a alta presión en la caverna. Para recuperar esa energía, el aire comprimido se libera y se hace circular a través de los turbogeneradores. La central, sita en McIntosh y explotada por la cooperativa PowerSouth Energy, puede producir 110 megavatios durante 26 horas. A pesar de ser la única instalación de aire comprimido en EE.UU., lleva 20 años funcionando a la perfección. La empresa alemana E.ON Kraftwerke, con sede en Hannover, explota una planta similar en Huntorf, en Baja Sajonia.

PowerSouth excavó su caverna disolviendo con agua un depósito de sal, el mismo proceso que se empleó para perforar los depósitos de la Reserva Estratégica de Petróleo estadounidense. Los depósitos de sal abundan en el sur de EE.UU., y la mayoría de los estados poseen algún tipo de formación geológica aprovechable, ya sean cavernas naturales o yacimientos de gas agotados.

Los planes para levantar instalaciones de aire comprimido ya han aparecido en otros estados, como California y Nueva York. Hace poco, sin embargo, se descartó la construcción de un parque de almacenamiento de 400 millones de dólares en Iowa por cuestiones técnicas: un estudio halló que la permeabilidad de la arenisca que debía contener el aire no resultaba aceptable.

Un inconveniente de este método reside en que el aire se calienta cuando se comprime y se enfría al expandirse. Eso significa que parte de la energía que se invierte en la compresión se disipará en forma de calor. Pero, además, cuando el aire se libera puede enfriarse hasta el punto de congelar todo cuanto toque, incluidas las turbinas. Por ello, PowerSouth y E.ON queman gas natural para caldear el aire que se dirige hacia las turbinas. Ello no solo reduce el rendimiento neto del sistema, sino que emite dióxido de carbono, lo que socava algunas de las ventajas de las energías solar y eólica.



Se están ideando algunas medidas para solucionar el problema del rendimiento de las instalaciones de aire comprimido. Una opción consistiría en aislar el depósito para conservar la temperatura del aire; otra, en trasvasar el calor a un depósito sólido o líquido, que sirviera después para recalentar el aire en expansión. SustainX, una empresa en ciernes radicada en New Hampshire, rocía el aire en compresión con pequeñas gotas de agua. Estas absorben el calor y se almacenan después en un estanque; por último, se atomizan de nuevo sobre el aire en su camino de salida, lo que eleva la temperatura. SustainX ha demostrado la validez del proceso en tanques de superficie. General Compression, una compañía de Massachusetts, se encuentra trabajando en la misma idea y planea una gran planta piloto en Texas. «No necesitaremos quemar nada de gas», asegura David Marcus, su presidente.

BATERÍAS

APLICABLE A GRAN ESCALA **3,6**

RENTABILIDAD ECONÓMICA **2,0**

RENDIMIENTO ENERGÉTICO **3,8**

VENTAJAS:	INCONVENIENTES:
RENDIMIENTO ENERGÉTICO, FIABILIDAD	PRECIO ELEVADO

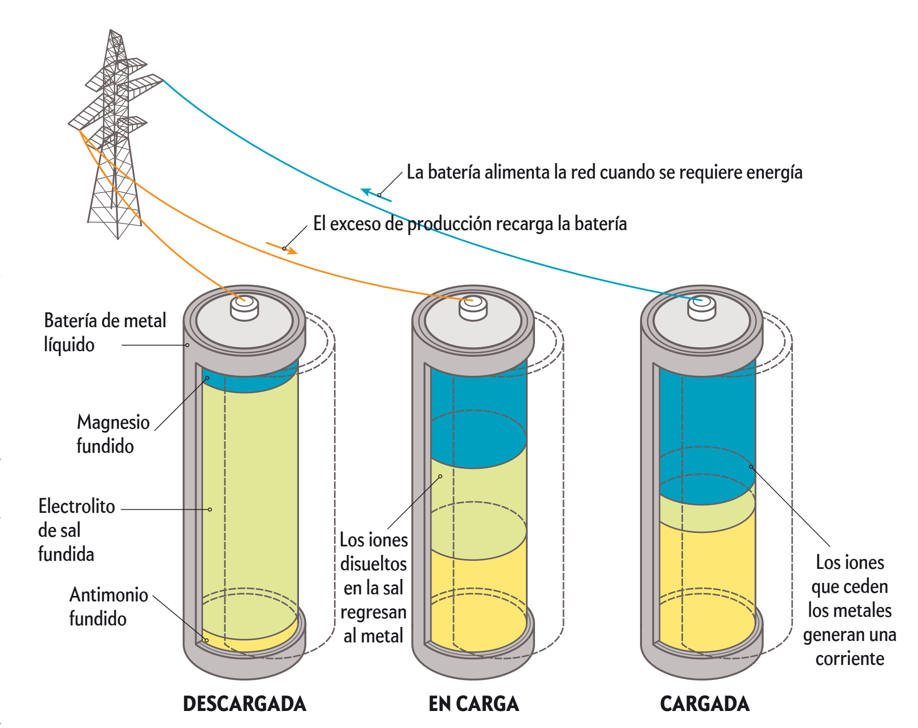
Algunos expertos opinan que las baterías podrían convertirse en el mejor medio de almacenamiento para las fuentes de energía intermitentes. Se recargan sin problemas, se encienden y se apagan al momento y, en principio, podrían utilizarse en cualquier tipo de central. Durante decenios, las compañías eléctricas han suministrado energía a los puntos más remotos de la red gracias al uso de baterías comunes, incluidas las de plomo y ácido de los automóviles. Algunas empresas han experimentado con baterías de sodio fundido y azufre. La compañía AES ha instalado más de 30 megavatios en baterías de litio en la ciudad de Elkins, en Virginia Occidental, como apoyo a los 98 megavatios de sus turbinas eólicas. Con todo, para que pudiesen convertirse en un método viable de almacenamiento, el precio de las baterías debería disminuir de manera considerable.

Los costes de una batería dependen de los materiales (los electrodos y el electrolito que los separa) y del proceso de manufacturación. Para rebajar su precio de manera sustancial, quizá resulte más prometedor apostar por diseños completamente nuevos que tratar de introducir pequeñas mejoras paulatinas en los modelos ya existentes.

Donald R. Sadoway, químico del Instituto de Tecnología de Massachusetts, está desarrollando lo que él denomina una «batería de metal líquido». Su potencial reside en su simplicidad: una

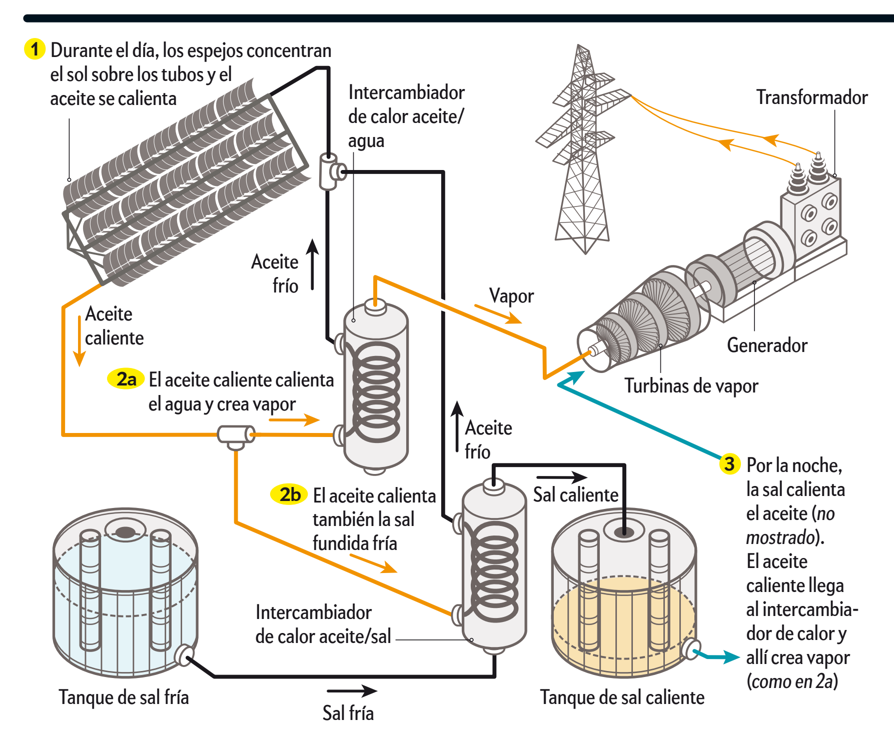
cuba cilíndrica y mantenida a alta temperatura se llena con dos metales fundidos separados por una sal, también fundida. La presencia de la sal impide que los metales se mezclen, por lo que el de menor densidad se apilará de manera natural sobre el segundo. Cuando ambos metales se conectan a través de un circuito externo, se establece una corriente eléctrica. Los iones de cada metal se disuelven en la sal fundida, lo que aumenta el grosor de esta capa intermedia. Para recargar la batería, el exceso de corriente de la red se emplea en invertir el proceso y devolver los iones a sus capas respectivas.

Hasta ahora, Sadoway ha fabricado prototipos de poco tamaño, pero cree que aumentar las proporciones podría resultar rentable; quizás, incluso más económico que los 100 dólares por kilovatio hora que ofrece el hidrobombeo. Sadoway no puede prever qué inconvenientes se encontrará al probar con dispositivos mayores, pero no esconde su entusiasmo ya que, a diferencia de la costosa y meticulosa manufactura que requieren las baterías tradicionales, las suyas no necesitan más que verter los materiales en un depósito.



Un diseño más contrastado es la batería de flujo. En un contenedor, una membrana de estado sólido separa dos electrodos líquidos, capaces de almacenar grandes cantidades de energía. El concepto de las baterías de flujo se acerca a una técnica más reciente apodada «crudo de Cambridge», que usa como electrodos nanopartículas suspendidas en un fluido [*véase* «Combustible líquido para vehículos eléctricos», por Christopher Mims; Investigación y Ciencia, febrero de 2012].

La batería de flujo posee varias ventajas. Al contrario que las baterías de metal líquido, que deben calentarse, funciona a temperatura ambiente. Para aumentar su capacidad, basta con unos electrodos más grandes o con añadir más contenedores. VRB Power Systems, una compañía ya desaparecida, instaló dos baterías de flujo con soluciones de vanadio (una en Utah y otra en una pequeña isla australiana) antes de vender su técnica a Prudence Energy, de Maryland. Otras empresas están intentando mejorar el rendimiento por medio de un aumento de la eficiencia del flujo de iones a través de la membrana. Mike Perry, ingeniero químico en United Technologies Corporation (UTC), explica que su empresa está invirtiendo millones de dólares en la idea, pues esperan que en unos cinco años las baterías de flujo se encuentren en condiciones de competir con las centrales térmicas de gas que hoy se emplean para cubrir los picos de demanda. También UTC ha apostado por el vanadio, pues se trata de un subproducto de la extracción del petróleo, abundante y asequible. Energizer Resources, de Toronto, explota una gran mina de vanadio en Madagascar para asegurar el abastecimiento.



ALMACENAMIENTO TÉRMICO

APLICABLE A GRAN ESCALA 3,6

RENTABILIDAD ECONÓMICA 3,6

RENDIMIENTO ENERGÉTICO 3,0

VENTAJAS:	INCONVENIENTES:
PUEDE INSTALARSE EN CUALQUIER LUGAR	CARO, DIFICULTADES PARA UN ALMACENAMIENTO PROLONGADO

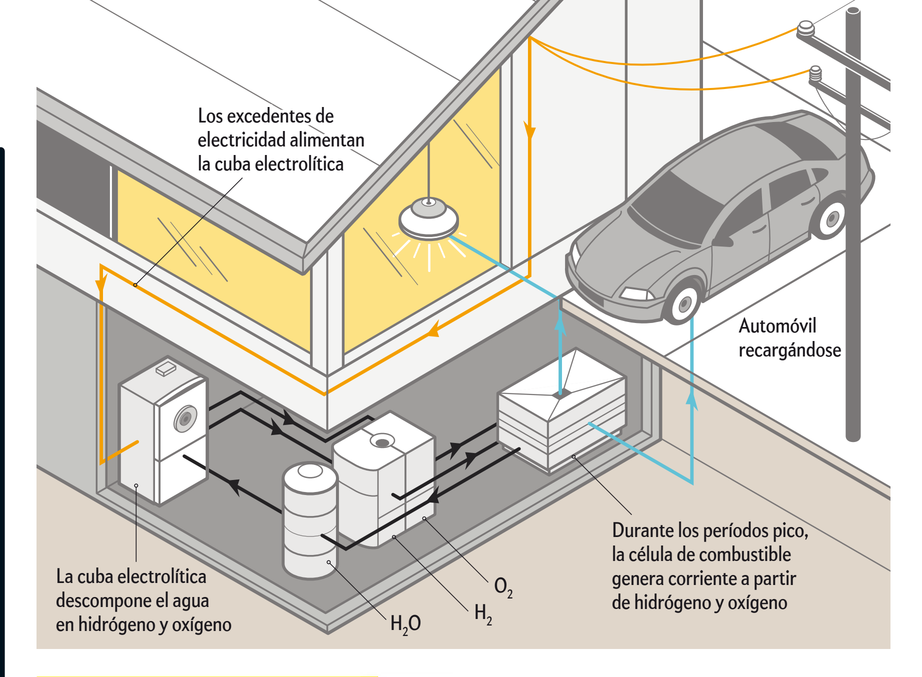
En las regiones con gran insolación, las centrales termosolares pueden brindar un procedimiento económico tanto para generar energía como para almacenarla. Hileras de espejos parabólicos concentran la luz solar sobre largas tuberías y calientan el fluido que estas transportan, como aceite mineral. El líquido fluye hacia una

instalación, donde calienta agua y genera el vapor que accionará las turbinas. Al ponerse el sol, el fluido puede almacenarse en tanques para, antes de enfriarse, producir más vapor durante al menos unas horas.

En EE.UU. y Europa funcionan unas cuantas centrales termosolares. Para retener más tiempo la energía térmica, la compañía italiana Archimede Solar Energy ha construido en Sicilia una planta de exhibición que emplea sal fundida en lugar de aceite. La sal puede calentarse hasta los 550 grados Celsius, frente a los 400 grados de los aceites, por lo que puede generar más vapor durante más tiempo después del ocaso, explica Paolo Martini, director comercial y financiero de Archimede. Para almacenar un megavatio hora hacen falta 5 metros cúbicos de sal fundida, frente a 12 de aceite. En España, la alemana Solar Millenium ha estado explotando en Andalucía, desde 2008, el sistema de sal fundida Andasol 1, de grandes dimensiones. En junio de 2011 alcanzó el hito de 24 horas de generación ininterrumpida.

Hoy, la electricidad de origen solar cuesta aproximadamente el doble que la de las centrales de gas. Sin embargo, los proyectos de la industria prevén que, con varios ajustes en el diseño de las plantas (incluida la química de los fluidos) y la implantación de economías de escala, la energía termosolar se encuentre en condiciones de competir con el gas natural antes de diez años. El éxito probablemente llegue para las plantas construidas en lugares donde rara vez hay nubes, como el desierto del Sahara.

El exceso de energía procedente de granjas eólicas u otras fuentes puede también emplearse para calentar líquidos y generar energía. Además, el almacenamiento térmico puede llevarse a cabo con frío, en lugar de con calor. Ice Energy, de Colorado, vende sistemas que producen hielo durante la noche, cuando la energía abunda. Durante el día, el hielo se funde para proporcionar refrigerante a instalaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Algunos clientes, como los supermercados, están comenzando a instalar tales dispositivos para aliviar la carga que el aire acondicionado impone sobre la red durante las horas más calurosas del día.



HIDRÓGENO DOMÉSTICO

APLICABLE A GRAN ESCALA	2,2
RENTABILIDAD ECONÓMICA	1,0
RENDIMIENTO ENERGÉTICO	1,4

VENTAJAS: EFICIENCIA, POCO PESO

INCONVENIENTES: SE NECESITA AVANZAR EN EL DISEÑO DE LOS MATERIALES BÁSICOS

Una posible manera, aún lejana, de almacenar energía podría llegar de la mano de los propios usuarios. La electrólisis, el proceso de descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno haciendo pasar por ella una corriente eléctrica, se conoce desde hace dos siglos. Ese hidrógeno podría luego emplearse en células de combustible para generar electricidad. El reto consiste en descomponer el agua y quemar el hidrógeno de manera eficiente, sin desperdiciar demasiado calor.

El rendimiento en la obtención de hidrógeno podría aumentarse de manera considerable si, en lugar de electricidad de la red, se empleara directamente la luz solar, tal y como hacen las plantas para llevar a cabo los procesos de hidrólisis durante la fotosíntesis. Hace años que se fabrican células hidrolíticas que realizan la misma función, pero resultan ineficientes y caras. Químicos como Daniel Nocera, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Nathan S. Lewis, del Instituto de Tecnología de California, han trabajado en el desarrollo de materiales de mejor calidad (catalizadores de cobalto, en el caso de Nocera, y nanobarras, en el de Lewis), pero los costes siguen siendo altos.

Se emplee electricidad o luz solar directa, los obstáculos que pesan sobre la reconversión son también enormes. Las células de combustible queman el hidrógeno con eficiencia, pero requieren materiales catalíticos muy caros, como el platino. Un equipo capaz de propulsar un automóvil o iluminar un edificio puede costar decenas de miles de dólares, por lo que actualmente se están investigando otras opciones. El almacenamiento del hidrógeno supone una dificultad más, ya que se trata de un gas explosivo y, por tanto, debe licuarse o comprimirse.

Si se superasen todas esas dificultades, los usuarios podrían disponer en casa de sus propias centrales eléctricas. Cuando la producción de energía eólica o solar de la compañía eléctrica local fuera excesiva, los usuarios emplearían esa energía para producir hidrógeno con el que luego abastecerían las viviendas en los momentos en los que el sol o el viento menguasen. Y, dado que la densidad energética del hidrógeno supera incluso a la de la gasolina, puede que algún día llegue a propulsar coches y camiones, conduciéndonos a la tan profetizada economía del hidrógeno.

PARA SABER MÁS

Sustainable energy-without the hot air. David J. C. MacKay. UIT Cambridge, 2009.

The role of energy storage with renewable electricity generation. Paul Denholm et al. Laboratorio Nacional de Energías Renovables, enero de 2010.

Integrating renewable electricity on the grid. Comisión de Asuntos Públicos de la Sociedad de Física Americana, noviembre 2010.

AGRICULTURA

EL FUTURO DEL CHOCOLATE

La ciencia se esfuerza por revitalizar el amenazado árbol del cacao y satisfacer la creciente demanda de chocolate, elaborado a partir de sus semillas

Harold Schmitz y Howard-Yana Shapiro

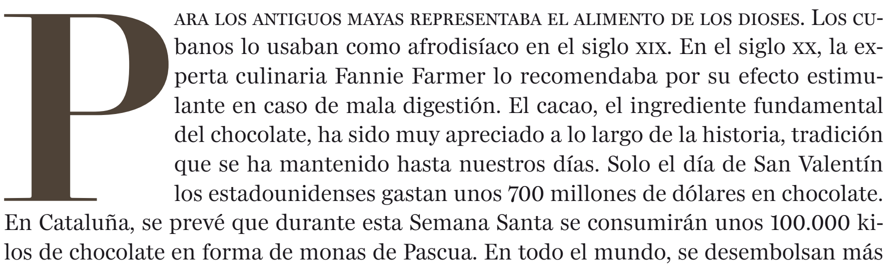


ADAM VOORHES



Harold Smith es director científico de Mars S.A. Bromatólogo de formación, se centra en la cadena de producción de alimentos y en su influencia sobre la salud humana y animal, así como en la sostenibilidad ambiental, social y cultural. Forma parte del comité ejecutivo del consorcio Gobierno-universidad-industria de las Academias Nacionales de Ciencias de EE.UU.

Howard-Yana Shapiro es responsable de botánica e investigación externa en Mars S.A., además de profesor de botánica en la Universidad de California en Davis. Dirigió la iniciativa mundial para secuenciar el genoma del árbol del cacao.



Para los antiguos mayas representaba el alimento de los dioses. Los cubanos lo usaban como afrodisíaco en el siglo xix. En el siglo xx, la experta culinaria Fannie Farmer lo recomendaba por su efecto estimulante en caso de mala digestión. El cacao, el ingrediente fundamental del chocolate, ha sido muy apreciado a lo largo de la historia, tradición que se ha mantenido hasta nuestros días. Solo el día de San Valentín los estadounidenses gastan unos 700 millones de dólares en chocolate. En Cataluña, se prevé que durante esta Semana Santa se consumirán unos 100.000 kilos de chocolate en forma de monas de Pascua. En todo el mundo, se desembolsan más de 90.000 millones de dólares al año para adquirir esta delicia. Y con el apetito en alza debido al crecimiento de la población y al mayor número de personas en los países en desarrollo, la demanda podría agotar el suministro en un futuro próximo.

Además de satisfacer a los golosos, la producción de chocolate tiene importantes repercusiones: entre cinco y seis millones de cultivadores del árbol del cacao en el trópico dependen de la venta de las semillas para alimentarse a sí mismos y a sus familias. Los trabajadores extraen las semillas (habas) de las mazorcas con forma de pelota de *rugby*, las hacen fermentar y las secan para hacer licor de cacao, manteca y cacao en polvo. El sustento de otros 40 o 50 millones se basa en la larga cadena de producción que recorre el cacao desde los cultivos hasta las estanterías de dulces. En Costa de Marfil, que produce el 60 por ciento del cacao del mundo, el cultivo constituye un 15 por ciento del PIB y da empleo al 15 por ciento de los hogares.

«Muchos de los agricultores utilizan el árbol de cacao para obtener dinero rápido. Cosechan algunas mazorcas y las venden para pagar gastos médicos o escolares. El árbol desempeña una función esencial en la vida rural», observa Peter Läderach, del Centro Internacional para la Agricultura Tropical, que ha dirigido recientes investigaciones sobre los efectos del cambio climático en el cultivo del cacao en Costa de Marfil y Ghana. Estos países, junto con Nigeria y Camerún, producen el 70 por ciento del cacao del mundo.

Pero el delicado árbol del chocolate, *Theobroma cacao*, se halla amenazado. La planta se ha mostrado siempre muy vulnerable a plagas e infecciones fúngicas. En 1988, solo seis años después de que nuestra compañía, Mars S.A., estableciera su Centro para la Ciencia del Cacao en la próspera región de cultivo de cacao en Bahía, Brasil, la zona se vio afectada por una enfermedad fúngica, la escoba de brujas. Fuimos testigos de cómo se reducía la producción en un 80 por ciento y de cómo personas cuya familia había cultivado cacao durante generaciones se veían forzadas a abandonar sus fincas y a trasladarse a barrios marginales de las ciudades. En unos pocos años desaparecía el gran archivo de conocimiento del cultivo de cacao acumulado durante siglos. Ahora, otra enfermedad fúngica, la podredumbre helada de la mazorca, se ha extendido por América Latina y pronto puede llegar a Brasil, donde podría resultar aún más devastadora que la escoba de brujas. ¿Y qué sucedería si esta última se introdujera en África Occidental, sea por accidente o por un acto de bioterrorismo?

Para empeorar las cosas, muchos agricultores, en especial los africanos, luchan por tener acceso a las mejores semillas, abonos y fungicidas, así como a la formación necesaria para usarlos correctamente. Las cosechas y los ingresos que estas generan solo alcanzan una tercera parte o menos de su potencial máximo. Incluso si el desastre no les golpea, las plantaciones sufren una fuerte presión para satisfacer la demanda prevista de cacao: los fabricantes calculan que la industria produce hoy unos 3,7 millones de toneladas de cacao y esperan que la demanda alcance los 4 millones en 2020.

A la vista de tales dificultades, nosotros y otros expertos en la industria del chocolate estamos preocupados porque, sin una acción rápida en varios frentes, el cultivo del cacao puede entrar en una espiral descendente. Con ese fin, las investigaciones se centran ahora en multiplicar los rendimientos de forma sostenible. Algunos de los trabajos implican la colaboración entre agricultores, corporaciones, universidades y agencias gubernamentales, incluido el Departamento de Agricultura de EE.UU. Una de estas colaboraciones, dirigida por Mars, ha secuenciado

EN SÍNTESIS

El consumo mundial de chocolate, fabricado a partir del cacao en polvo que se obtiene de las semillas del árbol del cacao, está en alza.

Pero el cultivo se halla amenazado por plagas, infecciones fúngicas, el cambio climático y la falta de acceso de los agricultores a fertilizantes y otros productos que mejoren el rendimiento.

Los investigadores trabajan para reforzar este frágil árbol mediante la selección genética, la formación de los agricultores y nuevas técnicas de plantación, riego y gestión de plagas.





La podredumbre negra infecta las mazorcas de un árbol del cacao en Filipinas (*arriba*). Plantar cacao junto con otros cultivos, como estos cocoteros en Brasil, proporciona ingresos y comida todo el año y mejora la capacidad de retención de agua de los cultivos (*abajo*).

el genoma del cacao en un intento de seleccionar árboles más resistentes. No sabemos aún si los esfuerzos lograrán un aumento del rendimiento suficiente para salvar el sustento de los agricultores y satisfacer la demanda mundial de chocolate, pero vemos algunos signos esperanzadores.

CULTIVO AMENAZADO



Parte del problema al que se enfrentan los agricultores (mejorar el rendimiento actual) radica en las dificultades que conlleva el cultivo del cacao. La planta es originaria del alto Amazonas, en lo que hoy es Ecuador, y fue importada a México durante el imperio de los olmecas, quienes iniciaron su cultivo, práctica que continuaron más tarde mayas y aztecas. Los marinos españoles y portugueses llevaron el árbol a sus colonias de África y Asia. Hoy en día el cacao crece solo en una estrecha franja de unos 18 grados, al norte y al sur del ecuador. Prefiere suelos ricos y bien drenados, que suelen escasear en el trópico. Y necesita calor y humedad, condiciones que a menudo acarrean numerosos problemas fúngicos, víricos y de plagas. Además de la escoba de brujas y la podredumbre helada de la mazorca, otras amenazas para el árbol son el virus de la hinchazón del brote y una polilla del sudeste asiático, el barrenador de la mazorca de cacao; solo este último ocasiona pérdidas de la cosecha valoradas en unos 600 millones de dólares al año. Los árboles del cacao de Ghana sufren daños por insectos, podredumbre negra de la mazorca, moho de agua y el virus de la hinchazón del brote. Los expertos temen que tales males ya estén afectando a los árboles más saludables en la vecina Costa de Marfil. Nos preocupa que Asia o África puedan experimentar un colapso parecido al de Brasil por culpa de estas amenazas.

La baja variabilidad genética del árbol tampoco ayuda. El experto en genética del cacao Juan Carlos Motamayor, de Mars, y sus colaboradores descubrieron con marcadores genéticos que el cacao incluye 10 variedades principales, todas ellas pertenecientes a la misma especie. Así, aunque la semejanza entre razas facilita las operaciones de cruzamiento entre ellas, también significa que las plantas obtenidas no contienen la suficiente variación como para producir una resiliencia natural a plagas y enfermedades; si una raza es genéticamente vulnerable, hay muchas probabilidades de que todas las demás sucumban. Cuando los agricultores conservan sus propias semillas para plantar nuevos árboles, la endogamia regional deja al árbol aún más indefenso frente a plagas y hongos.

Además de los obstáculos habituales, las condiciones de crecimiento parecen estar empeorando. Los fenómenos meteorológicos extremos, como inundaciones, sequías y tormentas de viento, siempre han dificultado la agricultura en el trópico. El cambio climático está empezando a intensificar estos extremos, lo que podría agravar las enfermedades e infestaciones e interrumpir el suministro de agua. El informe de 2007 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático predijo que hacia 2020 el rendimiento de los cultivos de secano, que constituyen la gran mayoría en África y entre los se incluye el cacao, podría reducirse en un 50 por ciento en algunos países. El mismo informe predice un aumento de la temperatura y una disminución de la cantidad de agua dulce en la Amazonía hacia la mitad de este siglo. Más aún, las investigaciones de Läderach sobre los efectos del cambio climático en Ghana y Costa de Marfil predicen que las áreas ideales para cultivar cacao se desplazarán a una mayor altitud para compensar el ascenso de las temperaturas. «El problema es que la mayor parte de África Occidental es llana y no existen zonas elevadas», comentó en una nota de prensa en 2011. Las oscilaciones climáticas podrían producir una drástica disminución de las tierras aptas para el cultivo del cacao. En Indonesia, por su parte, las lluvias monzónicas anuales están volviéndose más intensas en períodos cortos, lo que destruye a menudo las flores de los árboles e impide la formación de los frutos.

La pobreza exacerba esos problemas. En Costa de Marfil y en Ghana, los movimientos internos de distintas etnias y la inmigración desde el país vecino y más pobre, Burkina Faso, no solo han creado tensiones entre ricos y pobres, sino que también han enturbiado la situación sobre los derechos de propiedad. En ambos países, los agricultores dudan en invertir en plan-

taciones que quizá no hereden sus hijos, y muchos no quieren seguir cultivando cacao a menos que se mejore la productividad del árbol. Los jóvenes se están marchando de las zonas de cultivo del cacao, lo que se traduce en un incremento de la media de edad de los agricultores y en un descenso de su nivel de educación. Desgraciadamente, los fertilizantes, fungicidas y plaguicidas, que podrían incentivar la cosecha, apenas se utilizan en la región porque los agricultores no pueden permitírselo o no saben aplicarlos. Incluso si pudieran pagar esos gastos, la localización remota de las plantaciones, a las que a menudo solo se accede por carreteras mal conservadas, supondría un grave obstáculo para los Gobiernos y distribuidores que proporcionaran los productos y la formación necesaria para usarlos.

SALVAR EL CHOCOLATE

Debido a que la producción del cacao se ve perjudicada por las plagas, las enfermedades, el cambio climático y la pobreza, los esfuerzos han de centrarse en combatir esas amenazas, no en arrasar bosques tropicales para conseguir nuevas tierras cultivables. Los campos abandonados deben rehabilitarse mediante el aporte de abonos al suelo y la plantación de árboles y arbustos para contener la erosión. Mientras que el rendimiento medio en el mundo es de unos 450 kilogramos de frutos de cacao por hectárea, las plantaciones que emplean técnicas agrícolas modernas producen fácilmente 1500 kilogramos o más por hectárea. Para muchos cultivadores de los países en desarrollo, triplicar la cosecha significaría pasar de una renta de pobreza de un dólar al día a otra más razonable de tres dólares por día.

La ciencia dio un paso fundamental hacia la mejora del rendimiento hace unos dos años, cuando los investigadores de Mars, el Servicio de Investigación Agraria del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, IBM y otras instituciones secuenciaron y analizaron el genoma de la variedad Matina 1-6 de *T. cacao*, a la que muchos consideran la progenitora del 96 por ciento del cacao que se cultiva en el mundo. Más tarde difundimos de modo gratuito esa información en Internet, porque pensamos que ninguna organización dispone por sí sola de los recursos necesarios para salvar a tiempo la especie de las diversas crisis a las que se enfrenta. (Otro consorcio, dirigido por el Centro Internacional de Investigación en Agronomía

VARIACIÓN REGIONAL

Iniciativas para revitalizar el cultivo del cacao en el mundo

El árbol del cacao crece solo en una estrecha franja de unos 18 grados, al norte y al sur del ecuador. Las amenazas que sufren las plantaciones varían de una región a otra. Debajo se muestran los problemas más representativos y las posibles soluciones para mejorar su cultivo en el trópico.

Amenazas

La podredumbre helada es una enfermedad fúngica que ataca a las mazorcas de cacao; se ha extendido en América Latina y puede llegar pronto a Brasil.

Las lluvias erráticas en Brasil podrían empeorar debido al cambio climático, lo que sometería a los cultivos de cacao a dañinas sequías.

La pobreza en Ghana y otras zonas de África Occidental hace que los agricultores no puedan adquirir fertilizantes, fungicidas o plaguicidas (que podrían relanzar la producción de los cultivos) ni cuenten con la formación necesaria para aplicarlos con eficacia.

El barrenador de la mazorca de cacao, cuyas larvas se alimentan del interior de los frutos y dañan las semillas, causa pérdidas de cientos de millones de dólares al año en los cultivos del sudeste asiático.

Franja de cultivo del cacao

Seleccionar árboles más resistentes. A partir del mapa del genoma del cacao, los investigadores han identificado una variante de un gen que confiere resistencia a la podredumbre helada de la mazorca. Los agricultores están injertando en sus árboles ramas de cultivares resistentes.

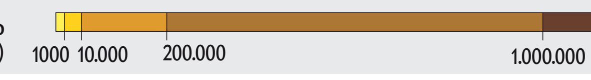
Desarrollar sistemas agroforestales mixtos. Plantar árboles del cacao entre cultivos alimentarios, árboles maderables y árboles forrajeros mejora la capacidad de retener agua del sistema gracias a la estructura variada de las raíces arbóreas.

Fomentar la autosuficiencia de los agricultores. El Programa de Sustento del Cacao promueve la formación de los agricultores, la diversificación de cultivos y la eficiencia de la cadena de abastecimiento.

Emplear técnicas de gestión integrada de plagas. Algunos agricultores ya no aplican exclusivamente pesticidas, que pueden perjudicar la biodiversidad local; por ejemplo, para controlar el barrenador de mazorcas, utilizan enemigos naturales de este insecto.

Soluciones

Producción de cacao (toneladas 2009)



FUENTE: ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (*producción de cacao en 2009*), GEORGE RETSECK (*ilustración*)

y Desarrollo, en Francia, anunció que había secuenciado una variedad distinta de cacao poco después de la publicación de nuestra secuencia).

Para ser eficaz, la investigación molecular sobre el cacao que se desarrolla en laboratorios del mundo desarrollado debe guardar relación con lo que están haciendo sobre el terreno los mejoradores de los países en vías de desarrollo. En consecuencia, Mars y el Servicio de Investigación Agraria han organizado durante la pasada década redes de mejoradores de cacao en África Occidental, sudeste de Asia y América Latina. Los mejoradores están utilizando el genoma del cacao para identificar, entre todas las variedades del mundo, las que presentan resistencia a las enfermedades, mayor rendimiento, mejor eficiencia en el uso del agua y nutrientes y adaptabilidad al cambio climático. Gracias a estas colaboraciones, cuando un mejorador de Costa Rica, Wilbert Phillips-Mora, descubrió un cultivar con cierta resistencia a la podredumbre helada de la mazorca, envió muestras a los biólogos moleculares de la red, que utilizaron el mapa del genoma para identificar la variante del gen del cultivar que confiere resistencia al temible hongo. En posteriores operaciones de selección, los mejoradores pueden determinar con rapidez si los nuevos cultivares son portadores de ese rasgo o de otras características útiles para la próxima generación de árboles de cacao. Los agricultores de América Latina ya están injertando ramas de las nuevas plantas en sus árboles.

Los mejoradores ya habían identificado cultivares que resisten la escoba de brujas, pero no producen cacao de alta calidad. El nuevo trabajo de mejoramiento, mediante meticulosos cruzamientos, aumenta las perspectivas de combinar los deseados atributos de resistencia y calidad en un único cultivar de *T. cacao*. Siguiendo la misma dirección, los investigadores han descubierto un tipo de cacao con resistencia a otra enfermedad fúngica, la raya vascular, y están analizando la base genética de ese carácter ventajoso. En resumen, los expertos esperan obtener árboles que sean resistentes a otros hongos y plagas y que se adapten al cambio climático, al tiempo que conserven la calidad de los frutos. También quieren conseguir plantas de menor altura. En la cosecha, los agricultores cortan las mazorcas del árbol con tijeras montadas en largos mástiles. Un árbol más bajo pero que produjera lo mismo, o más, exigiría menos recursos (agua, nutrientes) y resultaría más fácil de cosechar.

Pero incluso los árboles más bajos y tolerantes a la sequía necesitan cierta cantidad de agua. No importa lo eficientes que sean los cultivares: en última instancia, los agricultores deberán ingeniárselas para regar más plantaciones y no confiar en una lluvia errática. Cultivadores, científicos, organizaciones de ayuda y fundaciones están intentando distintas formas de resolver este problema en varias regiones. Brasil está trabajando en dos procedimientos distintos. En el primero, se está formando a pequeños agricultores para que pongan en marcha sistemas agroforestales mixtos, en los que se planten árboles de cacao entre otros cultivos alimentarios, árboles forrajeros y árboles maderables. Tales combinaciones mejoran la capacidad de retención de agua en todo el sistema gracias a la variedad de estructuras radiculares del conjunto arbóreo. El segundo procedimiento adopta el enfoque contrario: crear grandes plantaciones de árboles de cacao en Bahía (Brasil) a mayor altitud (fuera de las zonas donde suelen propagarse las plagas y enfermedades), a pleno sol, y regarlas con agua enriquecida con abonos para obtener la máxima productividad. Los cultivadores vietnamitas, algunos de los cuales se enfrentan a un declive de la cantidad de agua freática a causa de su aprovechamiento insostenible, están construyendo embalses para recoger el agua de lluvia y regar los árboles del cacao.

Lo mismo que con el suministro de agua, cada región cultivadora de cacao cuenta con sus problemas particulares y con las organizaciones que intentan solucionarlos. A principios de 2009, la Fundación Mundial del Cacao (WCF) puso en marcha un programa de 40 millones de dólares, financiado por la fundación Bill & Melinda Gates, para mejorar el sustento de unos 200.000 cultivadores de cacao en cinco países de África Occidental y Central. El Programa de Sustento del Cacao, de cinco años de duración, trabaja para promover la formación y competitividad de los agricultores, la productividad y la calidad del cultivo, la diversificación de la agricultura y la eficacia de la cadena de suministros. El programa se desarrolla en una serie de escuelas de campo creadas por la WCF para agricultores de cacao africanos, que siguen el modelo de escuelas de campo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Los gestores de las escuelas buscan dirigentes agrícolas locales para impartir la mayor parte de la enseñanza y, además de cubrir temas obvios como el tratamiento de enfermedades, la poda y la cosecha, las escuelas abordan cuestiones como la malaria, el sida, la seguridad en las granjas y la supresión del trabajo infantil. De acuerdo con el presidente de WCF, Bill Guyton, los graduados en estas escuelas han mejorado sus ingresos entre un 23 y un 55 por ciento.

En el sudeste asiático, los agricultores suelen obtener la formación que necesitan gracias a los servicios de extensión agraria. El principal reto en esa región es el desarrollo de técnicas de gestión integrada de plagas para luchar contra el devastador barrenador de mazorcas, un trabajo que no ha hecho más que empezar. Se contempla el empleo de trampas con feromonas y de hormigas negras (enemigas naturales del barrenador de mazorcas) para controlar la plaga, en lugar de contar únicamente con los plaguicidas, que podrían dañar la biodiversidad de la zona.

Triplicar los rendimientos del cacao de modo sostenible es perfectamente posible. Ya existen fertilizantes, fungicidas y programas de formación eficaces; y se están empezando a desarrollar cultivares resistentes a algunas de las patologías que han asolado desde hace tiempo al árbol del cacao. Pero hacer llegar todos estos recursos a agricultores pobres de zonas remotas para que prosperen y mejore su comunicación representa una tarea desmesurada para un único Gobierno, agencia de Naciones Unidas, compañía o proyecto. Para alcanzar ese objetivo se necesitarán coaliciones ambiciosas e innovadoras. Nos mostramos optimistas en que lograremos un futuro más seguro para el chocolate y el gran ecosistema social, cultural y ecológico que sostiene, pero debemos admitir que convertir el cacao en un cultivo plenamente sostenible constituirá sin duda un desafío enorme.

PARA SABER MÁS

Chocolate: History, culture, and heritage. Dirigido por Louis Evan Grivetti y Howard-Yana Shapiro. Wiley, 2009.

Cacao Genome Database: **www.cacaogenomedb.org**

The future of chocolate on Earth: A view from scientists on Mars: **www.youtube.com/watch?v=2BvTw5LtCis**

Securing cocoa's future: Rising to the challenge of cocoa sustainability: **www.mars.com/cocoasustainability/home.aspx**

Jean-Michel Lecerf es profesor del Instituto Pasteur de Lille, donde dirige el Servicio de Nutrición. También es asesor del Centro Hospitalario Regional Universitario de Lille, en el Servicio de Medicina Interna.

Sylvie Vancassel investiga en la Unidad de Nutrición y Regulación Lipídica de las Funciones Cerebrales del Instituto Nacional de Investigación Agronómica de Jouy-en-Josas en Francia.



NUTRICIÓN

Los ácidos grasos y la salud

Omnipresentes en el organismo, los ácidos grasos omega 3 y omega 6 son indispensables. Una alimentación variada y rica en pescado asegura un aporte suficiente de estos compuestos. Se está estudiando su uso terapéutico para combatir ciertas formas de depresión

Jean-Michel Lecerf y Sylvie Vancassel

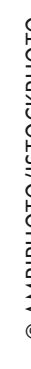
Una alimentación variada garantiza un aporte suficiente de ácidos grasos esenciales, sustancias indispensables para el buen funcionamiento del organismo y que este no sintetiza. El pescado azul es particularmente rico en ácidos grasos polinsaturados omega 3.

EN SÍNTESIS

El ácido alfa-linoleico y el ácido linoleico, principales moléculas de los omega 6 y omega 3, respectivamente, son indispensables para el organismo.

El organismo no los sintetiza, de modo que deben suministrarse con los alimentos, en especial, los aceites vegetales y el pescado. Con una alimentación variada no se observan carencias de ácidos grasos.

El ácido eicosapentaenoico y el ácido docosahexaenoico resultan necesarios para el buen funcionamiento del cerebro. Un aporte elevado de omega 3 aliviaría la depresión en algunas personas.



Los ácidos grasos omega 3 y 6 se hallan presentes en todo el organismo y llevan a cabo numerosas funciones fisiológicas. De hecho, son un componente importante de las membranas celulares de todos los tejidos, por lo que desempeñan un papel estructural y funcional esencial en los sistemas nervioso, cardiovascular, hormonal e inmunitario, entre otros. Se trata también de sustancias que almacenan energía (en el tejido adiposo) y se la proporcionan al organismo, por ejemplo, durante un esfuerzo muscular.

Los ácidos grasos son compuestos orgánicos constituidos por una cadena hidrocarbonada (formada por átomos de hidrógeno y de carbono) más o menos larga. Su nomenclatura se deriva del número de átomos de carbono y de dobles enlaces (no saturados) que contienen. El lugar del primer doble enlace a partir del grupo metilo (CH_3—) terminal define una familia: los ácidos grasos con varios enlaces no saturados (los ácidos grasos polinsaturados) cuyo primer doble enlace se sitúa en el sexto átomo de carbono de la cadena pertenecen a la familia de los omega 6; aquellos en los que ese enlace se ubica en el tercer átomo de carbono corresponden a la familia de los omega 3. Solo hay dos familias de ácidos grasos polinsaturados: los omega 6 y los omega 3. Los más importantes de ambas familias, el ácido linoleico y el ácido alfa-linoleico respectivamente, no son sintetizados por el ser humano ni por los animales, sino por las plantas: se los considera esenciales. Hay, además, ácidos grasos saturados que se obtienen a partir de la alimentación, pero también se sintetizan a partir de glúcidos o alcohol, y ácidos grasos monoinsaturados (con un solo doble enlace) procedentes de los ácidos grasos saturados y de la dieta.

La importancia del ácido linoleico se descubrió en la rata en 1929 y en la especie humana en 1958. En 1982 se demostró que el ácido alfa-linoleico resultaba esencial por sus funciones. Debido a que el organismo no lo sintetiza, debemos adquirirlo a través de la alimentación. La carencia de ácidos grasos esenciales causa trastornos cutáneos, neurológicos, de crecimiento y de reproducción. De todos modos, en los humanos dichos trastornos son muy raros porque las cantidades necesarias para garantizar estas funciones son extremadamente bajas y, por consiguiente, quedan cubiertas por la dieta. Pero incluso cuando no hay una carencia absoluta, un suministro insuficiente o en proporciones inadecuadas de los diferentes tipos de ácidos grasos puede causar desequilibrios y tener repercusiones en la salud.

Examinaremos primero las fuentes de ácidos grasos, el modo en que se metabolizan y sus funciones, en particular en el cerebro, el órgano más rico en lípidos después de tejido adiposo. De hecho, el cerebro se compone de un 60 por ciento de lípidos, sobre todo ácido araquidónico (AA) y ácido docosahexaenoico (DHA), que en conjunto contribuyen a casi el 30 por ciento de los lípidos del cerebro.

Los lípidos de los alimentos se someten a la acción de varias enzimas, en especial del duodeno y del páncreas, lo que libera ácidos grasos. En las células intestinales, vuelven a sintetizarse triglicéridos. Estos se presentan en forma de partículas lipídicas que son transportadas por la sangre hasta los músculos, donde proporcionan energía, hasta el tejido adiposo, donde se almacenan, y hasta el hígado, donde se transforman.

ILLUSTRER.FR

Los ácidos grasos no se ingieren como tales, sino en forma de triglicéridos, una combinación de tres ácidos grasos y glicerol (un alcohol). Emulsionados con las sales biliares en el duodeno, los triglicéridos de cadena larga (con más de diez átomos de carbono) se incorporan a micelas donde se someten a la acción de enzimas pancreáticas (lipasas). Estas enzimas los hidrolizan y permiten la liberación de los ácidos grasos en el interior de las células intestinales, los enterocitos, donde vuelven a unirse en forma de triglicéridos, asimilables por el organismo gracias a otra enzima, la acil-coenzima A: colesterol O-acil-transferasa (ACAT), y se «empaquetan» con la apoproteína B48 y colesterol.

El conjunto forma grandes partículas de lipoproteínas, los quilomicrones, que transportan los lípidos alimentarios a través de la sangre hasta los tejidos que los necesitan: los músculos que producen energía, el tejido adiposo que los almacena y el hígado que los metaboliza. En el hígado, otros transportadores de lípidos, las lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL, por sus siglas en inglés) proporcionan en cualquier momento los ácidos grasos y el colesterol a los tejidos.

Las familias de los ácidos grasos omega 3 y omega 6 son independientes, pero no del todo. Las desaturasas, las enzimas que crean los dobles enlaces entre átomos de carbono, funcionan en ambas familias, de modo que existe una competencia metabólica entre ellas: dependiendo de la cantidad de precursores de omega 3 y omega 6 disponibles y de la afinidad de la enzima por el sustrato, se metabolizarán de manera prioritaria las moléculas de una u otra familia. Al final de la cadena de cambios bioquímicos que experimentan los ácidos grasos ingeridos, el ácido linoleico se convierte en ácido araquidónico, mientras que el ácido alfa-linoleico se transforma en ácido eicosapentaenoico (EPA) y, finalmente, en DHA: son los ácidos grasos polinsaturados de cadena larga (AGPI-CL).

¿PARA QUÉ SIRVEN?

Todos los ácidos grasos (saturados, monoinsaturados y polinsaturados) proporcionan energía y desempeñan un papel importante en la estructura de las membranas celulares, sobre todo en el cerebro, donde intervienen en la neurotransmisión. Los ácidos grasos polinsaturados omega 6 y omega 3 se concentran en los fosfolípidos de las membranas celulares, donde son liberados por una enzima de la membrana, la fosfolipasa A2. Se originan entonces varios mediadores químicos con importantes propiedades fisiológicas. El ácido araquidónico (omega 6) y el EPA (omega 3) dan lugar a prostaglandinas, tromboxanos y leucotrienos. Estas moléculas intervienen en las reacciones de agregación de las plaquetas de la sangre, en los fenómenos inflamatorios y en la vasoconstricción. Además, el DHA favorece la producción de resolvinas y neuroprotectinas, otros mediadores que participan en la inmunidad y la inflamación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los distintos mediadores suelen presentar una acción antagonista, según provengan de la familia de los omega 3 o la de los omega 6. Como sucede siempre en las reacciones de ácidos grasos polinsaturados, las moléculas obtenidas y las reacciones que estas controlan dependen de sus respectivas proporciones.

El equilibrio de los omega 6 y omega 3 se determina desde las primeras etapas de la biotransformación del ácido linoleico y del ácido alfa-linoleico que, como hemos mencionado, compiten por las enzimas que los transforman. La primera etapa del proceso la lleva a cabo la enzima delta-6-desaturasa. Ahora bien, esta presenta mayor afinidad por el ácido alfa-linoleico que por

el linoleico. Pero, además de la afinidad de la enzima por su sustrato, hay que tener en cuenta la cantidad de sustrato disponible. El aporte de ácido linoleico con la alimentación actual supera en gran medida al del alfa-linoleico. Así pues, el producto menos concentrado es también aquel sobre el que la enzima actúa con preferencia, y viceversa, lo que garantiza el equilibrio entre los dos.

La cadena de biosíntesis de los omega 3 y de los omega 6, así como de sus productos derivados, comprende tantos eslabones que las circunstancias fisiológicas en la que puede originarse un desequilibrio resultan múltiples. En el recién nacido, debido a la inmadurez del sistema enzimático, se produce muy poca cantidad de EPA y sobre todo de DHA; por suerte, la leche materna compensa ese déficit. Por el contrario, en las mujeres, en especial en las embarazadas, la actividad de la enzima delta-6-desaturasa responsable de la síntesis de DHA aumenta, con lo que se satisface el aporte de DHA al feto y al recién nacido.

QUÍMICA

Nomenclatura de los ácidos grasos

Los ácidos grasos son compuestos orgánicos formados por una cadena hidrocarbonada más o menos larga, cuyo número de átomos de carbono aparece en el primer elemento de la nomenclatura. El número de dobles enlaces entre dos átomos de carbono determina su grado de insaturación.

En los ácidos grasos insaturados, el lugar del primer doble enlace a partir del grupo metilo (CH_3—) terminal se utiliza para definir la familia a la que pertenecen. Dentro de los ácidos grasos polinsaturados, los que tienen el primer doble enlace en el sexto átomo de carbono pertenecen a la familia de los omega 6; aquellos que lo tienen en el tercer átomo, a la de los omega 3.

Omega 3	Omega 6
Ácido alfa-linoleico: 18:3n-3 $CH_3-CH_2-[CH=CH-CH_2]_3-[CH_2]_6-COOH$	Ácido linoleico: 18:2n-6 $CH_3-[CH_2]_4-[CH=CH-CH_2]_2-[CH_2]_6-COOH$
Ácido eicosapentaenoico o EPA: 20:5n-3 $CH_3-CH_2-[CH=CH-CH_2]_5-[CH_2]_2-COOH$	Ácido araquidónico: 20:4n-6 $CH_3-[CH_2]_4-[CH=H-CH_2]_4-[CH_2]_2-COOH$
Ácido docosahexaenoico o DHA: 22:6n-3 $CH_3-CH_2-[CH=CH-CH_2]_6-[CH_2]-COOH$	

18:3n-3 significa que hay 18 átomos de carbono, tres dobles enlaces y que el primero de ellos se sitúa en el tercer átomo de carbono de la cadena a partir del grupo CH_3—.

¿ESENCIALES O INDISPENSABLES?

Hasta hace poco, solo se consideraban indispensables el ácido linoleico y el ácido alfa-linoleico, al no ser sintetizados por el organismo y dar lugar a numerosos derivados. En realidad, excepto en mujeres embarazadas, la bioconversión de ácido alfa-linoleico en EPA y en especial en DHA es muy inferior de lo que se pensaba, puesto que se atenúa ante un exceso de omega, un déficit de insulina, la desnutrición o el envejecimiento. Dadas las numerosas funciones del DHA y el descubrimiento de que su síntesis natural resulta a menudo insuficiente, las autoridades sanitarias lo han considerado indispensable, como los omega 3 y 6.

Precisaremos aquí la diferencia entre los ácidos grasos indispensables y los esenciales. Deberían designarse «indispensables» aquellos que el organismo no puede sintetizar por completo (los ácidos linoleico y alfa-linoleico) o de manera eficiente, como el DHA (el riesgo de déficit en EPA es inferior porque una parte del DHA se convierte de nuevo en EPA). El término «esencial» hace referencia a las funciones fundamentales que desempeñan los ácidos grasos, aunque su síntesis está asegurada por el organismo. Sin embargo, en la práctica a menudo se habla de ácidos grasos esenciales para denominar a los que son indispensables. En sentido estricto, los requisitos nutricionales solo se refieren a los indispensables desde el punto de vista de la nutrición: el ácido linoleico, el ácido alfa-linoleico y el DHA.

PRODUCTOS QUE CONTIENEN OMEGA

Numerosos alimentos de origen animal o vegetal contienen omega. El ácido alfa-linoleico se halla en las plantas, en especial en las semillas de lino, el germen de trigo, el cáñamo, las nueces, la soja, la colza y los aceites correspondientes. Las margarinas elaboradas con esos aceites presentan ácido alfa-linoleico (3 por ciento de la fase grasa); también el chocolate. En los productos lácteos, el contenido es bajo, pero, por la cantidad que se consume de ellos, representan la primera fuente de ácido alfa-linoleico. Los huevos poseen una escasa concentración, pero esta puede aumentar si se modifica la alimentación de los pollos con plantas como el lino o con microalgas.

De hecho, en las microalgas del fitoplancton abundan los ácidos grasos omega 3, el ácido alfa-linoleico y, en especial, el EPA y el DHA, lo que puede favorecer la acumulación de DHA en los huevos de gallinas cebados con microalgas. Sin embargo, en la alimentación humana los productos marinos siguen siendo la principal fuente de omega 3 de cadena larga. El pescado posee diferentes concentraciones de lípidos según la especie: del 20 al 30 por ciento de omega 3 del total de ácidos grasos, con proporciones variables de EPA y DHA. El de acuicultura contiene más omega 3 y mucho más omega 6 que el de captura. Pero el más rico en omega 3 es el pescado azul, sobre todo la sardina, la anchoa, la caballa, el arenque, el salmón, el fletán y el atún rojo.

Como se ha indicado, varios factores influyen en la concentración de ácidos grasos en el organismo, ya sea la edad del sujeto, su estado fisiológico o los alimentos consumidos. Se añade otro elemento importante, la biodisponibilidad, es decir, la cantidad realmente eficaz en relación con la cantidad ingerida. De este modo, el aporte de omega 3 en forma de triglicéridos $[(\text{-CH-O-R-CO})_3]$ resulta más eficaz que en forma de ésteres de etilo R-COOR', a pesar de que se encuentra así en algunas cápsulas de omega 3. La biodisponibilidad de los fosfolípidos (lípidos que contienen un grupo fosfato) es aún mejor. La posición del ácido graso respecto al glicerol ejerce una influencia determinante en la absorción; la posición central representa la más idónea.

En efecto, la hidrólisis por las lipasas pancreáticas libera ácidos grasos (en posiciones 1 y 3) que, en el intestino y en presencia de calcio, puede producir jabones insolubles que precipitan y se eliminan con las heces. En el huevo, los ácidos linoleico y alfa-linoleico ocupan con preferencia la posición 2. En el aceite de soja y en el de colza, ambos con una cantidad semejante de ácido alfa-linoleico, las concentraciones del ácido en posición 2 corresponden, respectivamente, al 23 y al 67 por ciento, lo que hace más recomendable el aceite de colza.

Necesidades y aportes aconsejados

Las necesidades fisiológicas mínimas para el ácido linoleico se han establecido en un 2 por ciento del aporte energético total, equivalentes a unos 4,5 gramos al día, lo que representa una cantidad muy baja, y para el ácido alfa-linoleico, en un 0,8 por ciento, o unos 2 gramos al día. En cuanto al DHA, se estima que se necesitan 250 miligramos al día, lo mismo que de EPA (un ácido graso que no es estrictamente indispensable).

Por definición, el aporte nutricional aconsejado no solo debe asegurar los requisitos mínimos para prevenir carencias, sino también garantizar una nutrición adecuada y equilibrada en su conjunto. Los valores tienen en cuenta la variabilidad interindividual y su objetivo es que el 97,5 por ciento de las personas se sitúen por encima del umbral mínimo; también pretenden evitar desequilibrios por exceso. Corresponden a un uno por ciento de ácido alfa-linoleico y a un 4 por ciento de ácido linoleico.

Por extrapolación de estos datos, la relación recomendada entre ácido linoleico y ácido alfa-linoleico se estima en cuatro. Sin embargo, el último informe de la Agencia Nacional Francesa de Seguridad Sanitaria, que ha revisado hace poco el aporte nutricional aconsejado de ácidos grasos, considera innecesaria tal relación cuando los valores absolutos en ácidos grasos omega 3 son suficientes. Pero si no lo son, un aporte excesivo de ácidos grasos omega 6 aumenta el riesgo de una conversión muy baja de su molécula principal (el ácido alfa-linoleico) en derivados superiores, especialmente el DHA. No hay un valor recomendado para el ácido araquidónico, porque este no resulta limitante si el aporte de ácido linoleico es suficiente.

Tras incidir en las fuentes y disponibilidad de omega 3 y omega 6, surge una pregunta: ¿se consume suficiente cantidad de estos compuestos esenciales? El aporte de ácidos grasos en la población francesa se conoce gracias a varios estudios. Destacan el SU.VI.MAX (suplemento de vitaminas y minerales antioxidantes), dirigido por Serge Herchberg, del Instituto Nacional de la Salud y la Investigación Médica, y el Aquitaine, llevado a cabo por el Instituto de la Grasa. Este último, realizado en mujeres jóvenes, demuestra que la ingesta de ácido alfa-linoleico representa el 0,3 por ciento del aporte energético total (en lugar del 1 por ciento recomendado), es decir, 0,7 gramos en vez de 2 gramos.

El estudio SU.VI.MAX confirma esos resultados. El aporte de ácido alfa-linoleico, en particular, pero también de EPA y DHA, es por término medio deficitario, mientras que el de ácido linoleico se ajusta a los valores nutricionales aconsejados. Sin embargo, hay grandes disparidades. Un estudio incluso reveló un elevado consumo en ciudades de la costa de Bretaña. En cuanto al ácido alfa-linoleico, el estado nutricional de los veganos (personas que no comen ningún producto de origen animal) es satisfactorio, pero muy deficitario en EPA y sobre todo en DHA.

La leche materna, los fosfolípidos de los glóbulos rojos y los triglicéridos del tejido adiposo encierran información sobre la composición de los ácidos grasos polinsaturados ingeridos por la población. El análisis de la leche materna constituye un método indirecto para conocer los aportes y su evolución. Entre 1940 y 2000, el contenido en ácido alfa-linoleico de la leche materna de las mujeres estadounidenses se mantuvo estable, mientras que el de ácido linoleico aumentó de forma considerable (de 5 a casi el 20 por ciento), lo que conllevó un incremento significativo en la relación entre los omega 6 y los omega 3. En 2007, la concentración de ácido alfa-linoleico de los habitantes de ocho regiones francesas se elevó (de 0,72 a 0,95 por ciento), pero la de DHA no varió.

Los estudios demuestran que la media de la población francesa no tiene cubiertas las necesidades fisiológicas de ácidos grasos omega 3, tanto de ácido alfa-linoleico como de DHA, pero no se constatan signos de carencia, que aparecen solo para niveles muy inferiores. Por suerte, la situación tiende a mejorar gracias a las campañas de sensibilización, el mayor consumo de aceite de colza y el enriquecimiento de ciertos alimentos. Aún hay que progresar para aumentar el aporte de EPA y DHA, moléculas de especial importancia en el cerebro.

Nos centraremos a continuación en las funciones de los ácidos grasos en el cerebro, el órgano con más lípidos después del tejido adiposo. Como hemos indicado, los lípidos constituyen cerca del 60 por ciento del cerebro, principalmente en forma de fosfolípidos en las membranas celulares. Los ácidos grasos polinsaturados de cadena larga se acumulan en las estructuras del cerebro durante el período perinatal, cuando madura el sistema nervioso. Casi la mitad del DHA total adquirido por el organismo durante los primeros seis meses de vida se incorpora al cerebro.

El DHA sintetizado por la futura madre se dirige a la placenta para satisfacer las necesidades del cerebro del feto. Un estudio publicado en 2007 demuestra la importancia de una alimentación materna rica en pescado para favorecer el desarrollo cerebral del feto: los niños de ocho años cuya madre había consumido poco pescado durante el embarazo presentaban un mayor riesgo de tener un coeficiente intelectual por debajo de la media.

LOS OMEGA EN EL CEREBRO

Su aporte insuficiente en la alimentación, como sucede en algunas poblaciones occidentales, puede provocar una disminución importante de DHA en las estructuras cerebrales de los niños:

Glosario

- **Ácidos grasos esenciales:** desempeñan un papel vital (esencial) y el organismo garantiza su síntesis.
- **Ácidos grasos indispensables:** el organismo es incapaz de sintetizarlos.
- **Ácidos grasos monoinsaturados:** formados por una cadena hidrocarbonada que contiene un doble enlace.
- **Ácidos grasos polinsaturados:** formados por una cadena hidrocarbonada que contiene varios dobles enlaces.
- **Omega 3:** familia de ácidos grasos polinsaturados cuyo primer doble enlace se sitúa en el tercer átomo de carbono de la cadena.
- **Omega 6:** familia de ácidos grasos polinsaturados cuyo primer doble enlace se sitúa en el sexto átomo de carbono de la cadena.
- **Fosfolípidos:** combinación de dos ácidos grasos, glicerol y grupos fosfato.
- **EPA y DHA:** ácidos grasos polinsaturados de la familia de los omega 3 derivados de ácidos grasos indispensables.

¿DÓNDE SE ENCUENTRAN?

Alimentos ricos en omega

Vegetales y animales terrestres

El ácido alfa-linoleico se halla ante todo en las plantas, ya que solo estas poseen una enzima delta-15-desaturasa que permite la transformación del ácido linoleico en ácido alfa-linoleico. Se presenta sobre todo en las semillas de lino, el germen de trigo, el cáñamo, las nueces, la soja, la colza y, por consiguiente, abunda en los aceites de linaza (constituye un 50 % de los ácidos grasos de ese aceite), de nuez (13 %), de colza (8 %), de soja (7 %), de germen de trigo (5 %) y de cáñamo (19 %).

Por supuesto, las margarinas de esos aceites y el chocolate contienen ácido alfa-linoleico. Este ácido constituye el 3 y el 2 %, respectivamente, de los ácidos grasos de tales alimentos. También se encuentra en plantas como la alfalfa, las espinacas, los canónigos o la verdolaga. De modo que la carne de los animales que se alimentan de esas plantas lo contiene: el conejo es la carne más rica en ácido alfa-linoleico (el 2,4 % de sus ácidos grasos), además del caballo, los caracoles que consumen verdolaga y los pollos que se alimentan de estos últimos.

La carne de caza presenta más ácido alfa-linoleico que la procedente de la ganadería. Los productos lácteos lo contienen en menor proporción, pero debido a la cantidad que se consume de ellos, representan la primera fuente de ese ácido; la mantequilla contiene algo menos del 1 % (un 1,5 % o más si procede de ganadería de praderas alpinas) y guarda une relación de 2,5 entre los omega 6 y los omega 3.

La grasa del cerdo (y por tanto los embutidos) posee un 0,82 % de ácido alfa-linoleico. La comida de los animales puede modificarse para enriquecer su carne (magra y grasa) en omega 3: la introducción del 5 % de semillas de lino en la alimentación de los cerdos y las aves de corral aumenta la concentración del ácido en su carne. Una dieta con una elevada proporción de lino, alfalfa y cáñamo también enriquece, aunque en menor grado, la carne y la leche de los rumiantes.

La yema de huevo contiene poco ácido alfa-linoleico, pero su nivel puede incrementarse modificando la alimentación de las gallinas con plantas como el lino o con microalgas.

En las microalgas del fitoplancton abundan los ácidos grasos omega 3, no solo el alfa-linoleico, sino también y sobre todo el EPA y el DHA. En la dieta humana, los productos marinos son la principal fuente de omega 3. El pescado presenta cantidades variables de lípidos y se puede distinguir entre el pescado blanco (magro), el semigraso y el azul (graso), con concentraciones que van desde el 0,1 al 20 %.

Recursos marinos

Entre un 20 y un 30 % de los ácidos grasos del pescado corresponde a omega 3 (el porcentaje varía según la especie), con proporciones variables de EPA y de DHA (como promedio, dos veces más de EPA que de DHA). El pescado de acuicultura contiene más omega 3 y muchos más ácidos grasos omega 6 que el pescado de captura, pero la relación entre los omega 6 y los omega 3 de ambos tipos se mantiene muy baja (0,25 en el salmón de cultivo y 0,1 en el salmón de captura).

El pescado, especialmente el graso, constituye la mejor fuente de omega 3. Su concentración varía según el tejido (el hígado en el pescado blanco y la carne en el pescado azul acumulan más), la madurez sexual, la edad, la estación, el lugar de pesca y, ante todo, la especie. Los más ricos en omega 3 son la sardina, la anchoa, el arenque, la caballa, el salmón, el fletán, el atún rojo... El contenido en omega 3 disminuye con el tiempo en los congelados, mientras que en las conservas permanece estable, aunque se producen intercambios de ácidos grasos entre el pescado y el aceite que lo cubre.



Según el estudio Aquitaine, el ácido alfa-linoleico que se consume es de origen animal en un 73 %. El 46 % procede de productos lácteos (28 de la leche y derivados, 18 de la mantequilla y 29 del queso) y el 27 %, de productos cárnicos. El 11 % viene de aceites vegetales y el 16 %, de otros cuerpos grasos de origen vegetal. Según el estudio SU.VI.MAX, el 25 % del aporte de ácido alfa-linoleico se debe al consumo de productos lácteos y el 17 %, al de carne, aves de corral y huevos. Y la parte más importante del resto del EPA (72 %) y del DHA (65 %) procede del pescado y el marisco.

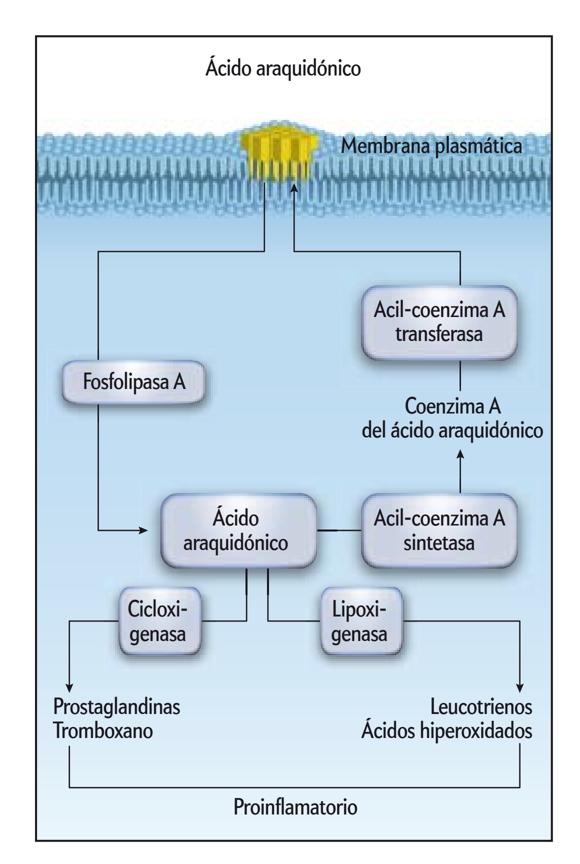
en bebés de seis meses alimentados con leche maternizada sin DHA, la concentración de ese compuesto es a veces un 50 por ciento inferior a la de los bebés amamantados.

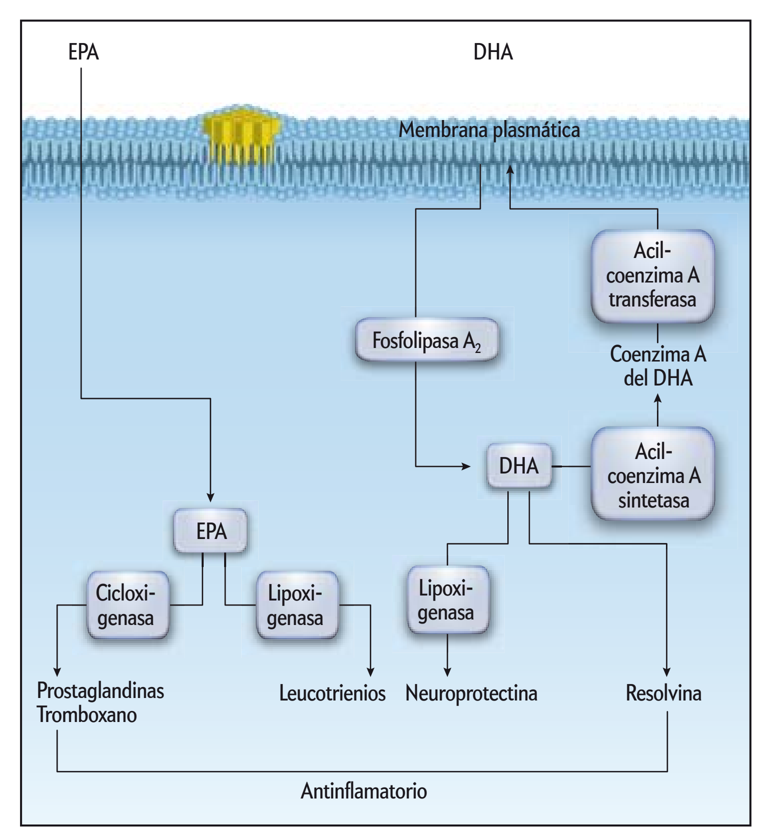
Por tanto, resulta necesario asegurar un suministro regular de DHA, ya que este ácido graso polinsaturado (y otros) se renueva sin cesar. El equipo de Stanley Rapoport, de los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU., en Bethesda, estudiaron el intercambio de trazadores radiactivos entre el cerebro y el plasma, y calcularon la renovación diaria de DHA en un 5 por ciento en ratas adultas y en un 0,3 por ciento en las personas. A partir de esos datos y del tiempo necesario para restaurar los niveles normales de DHA cerebral después de una carencia, se estima una vida media del DHA en el cerebro adulto de unas dos semanas. La sangre debería aportar cada día entre cuatro y cinco miligramos de DHA al cerebro para que se mantuviera su concentración. Las células endoteliales que forman la barrera hematoencefálica que protege al cerebro y los astrocitos (un tipo de células nerviosas diferentes de las neuronas) también sintetizan DHA a partir de su precursor, el ácido linoleico, pero en cantidades insignificantes.

¿QUÉ HACE EL DHA?

En el cerebro, los ácidos grasos polinsaturados constituyen, por un lado, el componente principal de los fosfolípidos de la membrana de las neuronas y, por otro, las moléculas activas que interaccionan directamente con otros lípidos o proteínas.

Abordemos primero su función estructural. La membrana plasmática se organiza en una bicapa lipídica asimétrica y heterogénea, y los fosfolípidos se distribuyen de manera distinta entre las capas internas y externas. Además, las diferencias en la





Según las vías metabólicas en las que intervienen, los ácidos grasos polinsaturados originan mediadores de la inmunidad o de la inflamación, con propiedades opuestas. Así, la oxidación del ácido araquidónico por las enzimas cicloxigenasas o lipoxigenasas libera moléculas que estimulan los mecanismos inflamatorios: prostaglandinas, leucotrienos, ácidos hiperoxidados (*izquierda*). El EPA origina otra clase de prostaglandinas o de leucotrienos que, a su vez, inhiben los mecanismos de la inflamación (*derecha*). Además, el DHA produce resolvinas y neuroprotectinas, que poseen propiedades antinflamatorias. Esta vía de oxigenación enzimática del DHA podría proteger el cerebro contra el daño causado por el estrés oxidativo.

afinidad entre los lípidos llevan a la formación de microdominios específicos, las balsas lipídicas, ricas en colesterol y esfingomielina y pobres en DHA. Estas, asociadas a las proteínas del citoesqueleto, forman unas estructuras rígidas en la membrana y constituyen zonas privilegiadas para la actividad de ciertas proteínas allí integradas. Así, las proteínas del complejo SNARE, indispensables para la fusión de las membranas en la exocitosis (proceso que permite a una célula expulsar una parte de su contenido al medio extracelular) se hallan asociadas al colesterol. Se localizan con preferencia en esas balsas moleculares y forman sitios privilegiados para la liberación de neurotransmisores, los mensajeros químicos que intervienen en los impulsos nerviosos.

Los omega 3, sobre todo el DHA, modulan la actividad de numerosas enzimas, transportadores, receptores y canales de membrana que participan en la señalización intercelular e intracelular. Dado que el DHA presenta una concentración muy elevada en el cerebro, describiremos con detalle sus acciones.

El DHA es un regulador de la expresión génica. En el hígado, los ácidos grasos polinsaturados controlan la expresión de genes que intervienen en su metabolismo, con lo que retroalimentan su propia actividad. En cambio, sabemos muy poco sobre la regulación génica que ejercen los ácidos grasos polinsaturados en el cerebro. Sin embargo, se ha demostrado que las dietas ricas en omega 3 influyen sobre varios genes en el cerebro de los roedores, con numerosas consecuencias. Dichos genes participan en la neurotransmisión, la producción de ATP (la energía de las células), la regulación de los flujos de iones, el metabolismo energético, la plasticidad sináptica, la neurogénesis, las conexiones intercelulares, etcétera.

El DHA libre también puede ser peroxidado por radicales libres, lo que conduce a la producción de derivados peroxidados, los neuroprostanos. Estas moléculas se concentran en el líquido cefalorraquídeo de personas afectadas de alzhéimer, debido al fuerte estrés oxidativo que se ha observado en esta enfermedad. Puede que tales compuestos contribuyan al daño celular y a la pérdida neuronal que acompañan a las enfermedades neurodegenerativas.

Los ácidos grasos polinsaturados actúan sobre el funcionamiento del cerebro de otra manera: regulando la función sináptica. Ello exige una acción concertada de diferentes tipos de células: las neuronas que liberan los neurotransmisores, los astrocitos que modulan la neurotransmisión y aseguran el equilibrio sináptico, y las células endoteliales que proporcionan energía en forma de glucosa a las neuronas. Esta estructura tripartita confiere plasticidad morfológica y funcional a la sinapsis.

PAPEL EN LA NEUROTRANSMISIÓN

Los estudios de los últimos veinte años demuestran que los ácidos grasos polinsaturados influyen en la actividad de todas esas células. En los roedores, los cambios en la composición lipídica de las membranas del cerebro provocados por una dieta sin omega 3 se asocian a trastornos funcionales de la neurotrans-

Reducir el riesgo cardiovascular

Los primeros trabajos sobre la posible función de los ácidos grasos omega 3 en la prevención de las enfermedades cardiovasculares datan de los años sesenta y setenta del siglo XX, en los que se observó que la prevalencia de infarto de miocardio en los esquimales de Groenlandia era muy baja. Se concluyó que la elevada ingesta de ácidos grasos omega 3 de cadena larga con el consumo de pescado debía de ofrecer tal beneficio, ya que los omega 3 reducen la agregación plaquetaria.

En Francia, Serge Renaud, por entonces en el Hospital de Burdeos, demostró que el ácido alfa-linoleico, precursor del EPA, ejercía un efecto protector y, a finales de los años ochenta, Michel de Lorgeril, entonces en el Hospital de Lyon, diseñó un ensayo clínico en el que se daba una margarina rica en aceite de colza a personas con riesgo de padecer alguna enfermedad cardiovascular. En 1988, uno de los autores (Lecerf) desarrolló, con un industrial, la primera margarina rica en ácido alfa-linoleico.

Para evaluar los efectos de los ácidos grasos polinsaturados, hoy en día se dispone de estudios de observación (como en el caso de los esquimales) y de estudios de intervención secundaria, es decir, que examinan el efecto de los omega 3 administrados a personas que ya han sufrido un ataque cardíaco. En cambio, no se ha realizado ningún estudio de intervención en prevención primaria, que consistiría en ofrecer ácidos grasos omega 3 a personas que no hayan padecido ninguna enfermedad cardiovascular. En los estudios de intervención (ya sea primaria o secundaria), se analiza el efecto del medicamento en un grupo en comparación con otro que recibe un placebo o no recibe ningún tratamiento.

Los primeros resultados fueron, pues, proporcionados por estudios epidemiológicos de observación. Más de una treintena de ellos demostraron que los trastornos cardiovasculares (infarto de miocardio, enfermedades coronarias) y la mortalidad asociada a esas dolencias se reducen un 30 por ciento entre los que consumen más pescado, especialmente pescado azul. Varias investigaciones han confirmado también las ventajas de los ácidos grasos omega 3 de cadena larga y del ácido alfa-linoleico. Se constata una disminución del 50 al 80 por ciento de riesgo de muerte súbita, la causa principal de muerte por trastornos coronarios.

No obstante, los aportes simultáneos y elevados de ácidos grasos insaturados *trans* (en las cadenas *trans*, las partes anterior y posterior al doble enlace se sitúan una al lado opuesto de la otra) o de ácidos grasos omega 6 disminuyen tal beneficio. En relación a los omega 3 de cadena larga, diversos estudios de intervención secundaria han demostrado que reducen entre un 20 y un 30 por ciento la mortalidad o las enfermedades cardiovasculares, y un 45 por ciento la muerte súbita. Otros dos ensayos confirmaron una mejoría en la insuficiencia cardíaca.

En un estudio reciente, una ingesta reducida de EPA (226 miligramos) y DHA (150 miligramos) produjo una disminución del 49 por ciento de enfermedad coronaria letal y de arritmias en pacientes diabéticos. En cambio, no se observaron beneficios en el conjunto de esta población con riesgo coronario, tal vez debido a la mejor atención actual en términos de salud y nutrición. Pero hay que destacar que esos estudios son de prevención secundaria, ya que se realizaron después de un infarto.

Respecto al ácido alfa-linoleico, solo hay un ensayo de intervención secundaria, y este reveló que el compuesto es recomendable para mujeres y personas diabéticas.

Así, los omega 3 previenen las enfermedades cardiovasculares tras un infarto de miocardio por su efecto positivo sobre la agregación plaquetaria (impiden una nueva trombosis), sobre la estabilización de la placa de ateroma por su efecto antinflamatorio (de ahí la recomendación de prescribirlo lo más pronto posible) y, sobre todo, porque reducen las arritmias, lo que evita la muerte súbita, a menudo asociada a una arritmia fatal.

Numerosos estudios experimentales y clínicos parecen indicar que los omega 3 mitigan las arritmias asociadas a una cardiopatía isquémica, en la que se altera la oxigenación de los tejidos.

misión. Estos trastornos se han examinado en sistemas donde intervienen los neurotransmisores monoaminas y acetilcolina, que regulan importantes funciones biológicas, como el movimiento voluntario y los procesos cognitivos y emocionales.

En ratas con carencia de omega 3 se ha observado una disminución en la concentración de dopamina en la sinapsis de la corteza frontal, así como un aumento de sus metabolitos, lo que sugiere una hiperactivación de su metabolismo. Por el contrario, en el núcleo accumbens, una región cerebral del circuito de la recompensa que regula el aprendizaje, aumenta la liberación de dopamina. Las pruebas acumuladas, entre ellas las del grupo de Ephraim Yavín, del Instituto Weizmann en Rehovot, indican que en las ratas recién nacidas sometidas a una carencia perinatal de omega 3 los receptores dopaminérgicos se sobreexpresan en ciertas áreas del cerebro, tal vez para compensar los bajos niveles de dopamina de los animales tratados.

Nuestros investigadores han demostrado, asimismo, que la serotonina, un neurotransmisor que interviene en el miedo y la ansiedad, se halla también bajo el control de los ácidos grasos polinsaturados. Hemos observado cambios en la liberación de ese compuesto en el hipocampo, una región del cerebro esencial para la memorización. Los niveles de dopamina y serotonina en animales con déficit de omega 3 pueden restablecerse siempre que se vuelva a introducir pronto el precursor de los ácidos grasos omega 3 a través de la alimentación materna; entonces, las membranas del cerebro recuperan su composición lipídica normal. Pero si la reintroducción se lleva a cabo después del destete, la liberación de neurotransmisores se altera, incluso aunque la concentración de DHA en las membranas celulares del cerebro se haya normalizado.

De igual modo, otro neurotransmisor involucrado en los procesos de aprendizaje y memorización, la acetilcolina, presenta una concentración anómala en roedores con carencia de omega 3. Ahora bien, los distintos neurotransmisores se almacenan en vesículas (pequeñas bolsas) que se fusionan con la membrana de la terminación de las neuronas y «se abren» para liberar su contenido en las sinapsis (lugar donde se mide su concentración). Los estudios se centran ahora en el proceso de exocitosis, cuyas etapas podrían estar reguladas directa o indirectamente por los ácidos grasos polinsaturados.

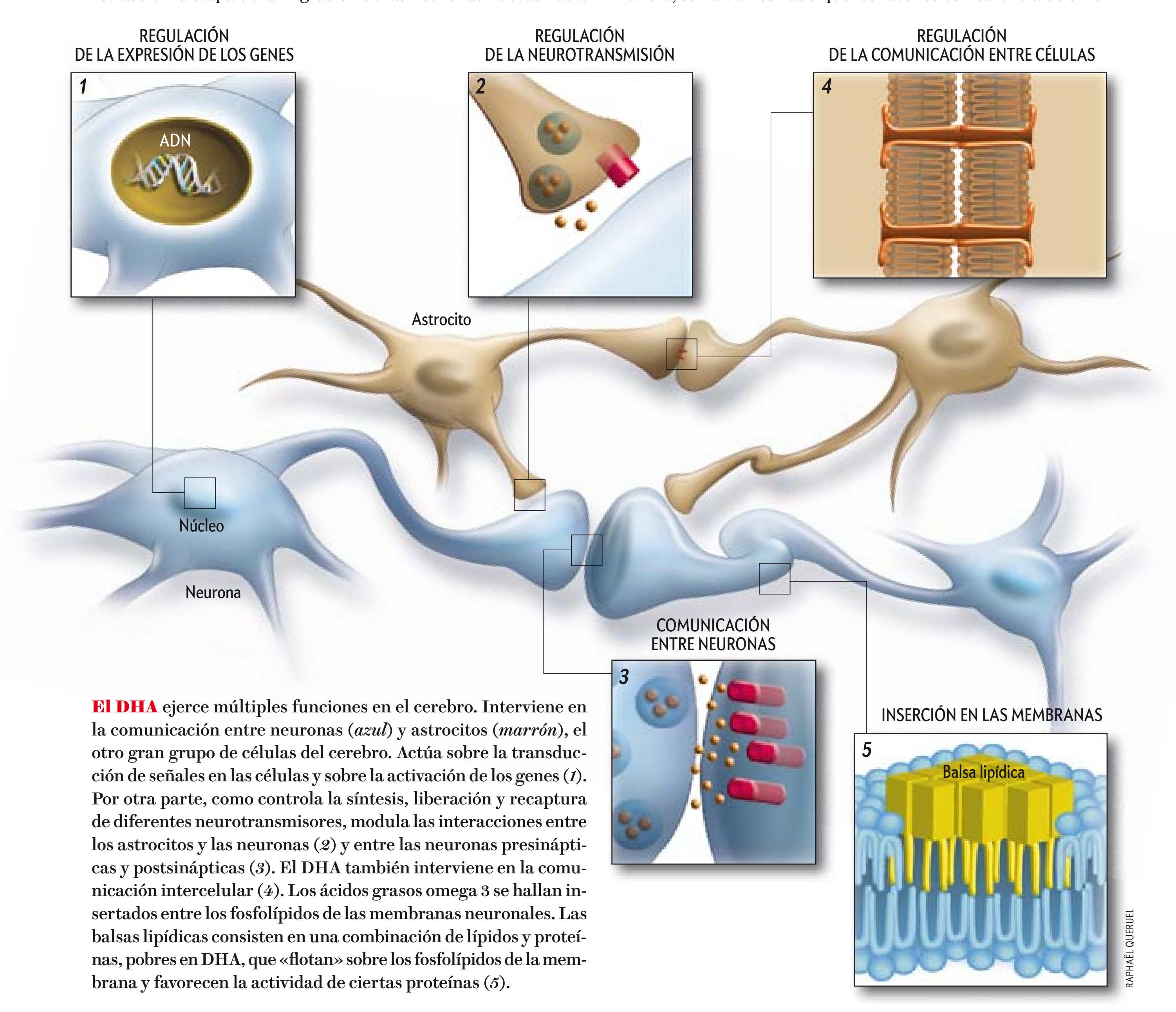
En cuanto a los astrocitos, hemos demostrado que la concentración de DHA en la membrana contribuye a la plasticidad morfológica de esas células; el DHA posiblemente interviene en la reordenación del citoesqueleto (el «esqueleto» de las células) y en el tráfico de proteínas hacia la membrana. Además, inhibe la migración de los astrocitos y parece controlar el transporte de glutamato, el principal neurotransmisor excitatorio; por tanto, desempeña un papel fundamental en la neuroprotección que confieren los astrocitos durante el estrés fisiológico.

La renovación de las células cerebrales a partir de células madre (la neurogénesis) influye también en la actividad sináptica y contribuye al mantenimiento de una neurotransmisión eficaz. En la persona adulta, tal proceso ayuda a reparar las lesiones y a consolidar el aprendizaje y la memoria. Limitada a unas pocas regiones, en el cerebro adulto (sobre todo el hipocampo), la neurogénesis depende de factores externos variables, como la edad o el estrés. Algunos datos recientes indican que la carencia de DHA altera, asimismo, ese proceso. En concreto, parece provocar un retraso en la etapa de la migración de las neuronas nuevas hacia el hipocampo; por tanto, existe el riesgo de que las nuevas neuronas no se conecten correctamente con su zona de destino y que, por consiguiente, no sean funcionales.

Todos estos resultados demuestran que un déficit de DHA en la membrana, aunque sea leve (correspondiente a un aporte insuficiente de omega 3), puede alterar la regulación general de la función sináptica. Parece que existe un período crítico del desarrollo (durante el embarazo y los dos primeros años de vida) durante el cual se necesita un aporte óptimo de omega 3 para asegurar el buen funcionamiento del cerebro en los adultos. Los resultados ponen de relieve la importancia de investigaciones futuras que tengan como objetivo comprender mejor los efectos precoces de la nutrición en el cerebro.

DHA Y DEPRESIÓN

Si se varía el suministro de ácidos grasos polinsaturados a la madre durante el período crítico de su acumulación en el feto se puede cambiar la composición de lípidos del cerebro. De esta manera, se ha demostrado que los ratones con carencia de ome-



El DHA ejerce múltiples funciones en el cerebro. Interviene en la comunicación entre neuronas (*azul*) y astrocitos (*marrón*), el otro gran grupo de células del cerebro. Actúa sobre la transducción de señales en las células y sobre la activación de los genes (*1*). Por otra parte, como controla la síntesis, liberación y recaptura de diferentes neurotransmisores, modula las interacciones entre los astrocitos y las neuronas (*2*) y entre las neuronas presinápticas y postsinápticas (*3*). El DHA también interviene en la comunicación intercelular (*4*). Los ácidos grasos omega 3 se hallan insertados entre los fosfolípidos de las membranas neuronales. Las balsas lipídicas consisten en una combinación de lípidos y proteínas, pobres en DHA, que «flotan» sobre los fosfolípidos de la membrana y favorecen la actividad de ciertas proteínas (*5*).

ga 3 obtienen peores resultados en las pruebas de memoria espacial (asociada al hipocampo). Dichos ratones también exhiben una menor memoria de trabajo (asociada a la corteza frontal), así como un déficit en el aprendizaje. Por otra parte, las ratas con carencia de omega 3 presentan un comportamiento rígido, que se manifiesta en una dificultad de adaptación ante un cambio en el entorno.

Por el contrario, enriquecer la dieta con ácidos grasos omega 3 mejora el rendimiento cognitivo. Así, el ratón transgénico fat-1, que sintetiza grandes cantidades de DHA, aprende a orientarse mejor en el espacio. En esos animales se produce una mayor proliferación y diferenciación de las neuronas, lo que concuerda con el supuesto papel del DHA en la neurogénesis y el aprendizaje.

Los animales también muestran signos de ansiedad, agresividad y depresión. Tales trastornos se hacen patentes sobre todo cuando el animal se enfrenta a una situación de estrés intenso; se acompañan de un aumento de la concentración en sangre de corticosterona, la principal hormona del estrés, aumento superior al de los animales alimentados con una dieta equilibrada.

Estos resultados sugieren que un aporte insuficiente de omega 3 puede causar un efecto perjudicial en el control del estrés y promover, a largo plazo, la aparición de trastornos de tipo depresivo. Por el contrario, el aporte de ese ácido graso con la alimentación parece ofrecer protección en tales situaciones: el DHA tendría un efecto ansiolítico, ya que modula sobre todo la actividad de los receptores estimulados en los estados de ansiedad.

Cabe preguntarse si las alteraciones de la neurotransmisión relacionadas con deficiencias en omega 3 pueden favorecer los trastornos del estado de ánimo, especialmente la depresión. Esta enfermedad es muy frecuente en los países desarrollados, con una prevalencia alta (del 15 al 20 por ciento de la población de Europa y América del Norte). La depresión constituye una dolencia asociada a múltiples factores, entre ellos genéticos y neurobiológicos, así como socioculturales y ambientales.

CONTRA LOS CAMBIOS EN EL ESTADO DE ÁNIMO

Algunas investigaciones recientes indican que la alimentación influye en ciertas formas de depresión. Los estudios de observación demuestran que los pacientes depresivos presentan niveles de omega 3 por debajo de la media en la sangre y el tejido adiposo, y que los síntomas se agravan cuanto más baja es la concentración de DHA. No obstante, los ensayos en los que se ha administrado omega 3 a personas con depresión no han dado resultados concluyentes debido a la variabilidad de los preparados de omega 3 utilizados, las dosis administradas y la duración del tratamiento, así como a la disparidad de los sujetos estudiados. En cambio, la administración de DHA y EPA mejora el estado de ánimo. Algunos pacientes con depresión resistentes al tratamiento han mejorado mucho con un gramo diario de EPA. Todos estos datos sugieren que una ingesta insuficiente de omega 3 podría aumentar la vulnerabilidad a los estados depresivos.

¿Qué vínculo hay entre el déficit de omega 3 y la depresión? Como hemos señalado, el DHA ejerce un control sobre numerosos neurotransmisores, en especial la serotonina y la dopamina (el sistema monoaminérgico), sustancias que se utilizan en los tratamientos antidepresivos. Por tanto, la deficiencia crónica de omega 3 favorecería la aparición de trastornos depresivos al alterar el funcionamiento de los sistemas de neurotransmisión. Se ha propuesto otra hipótesis para explicar la relación entre los omega 3 y la depresión: el metabolismo de los ácidos grasos polinsaturados resultaría afectado por una actividad muy baja de las enzimas que intervienen en la cadena metabólica. Este defecto sería de origen genético. A ello se sumaría un aporte insuficiente de omega 3. Ambas anomalías se traducirían en una presencia insuficiente de DHA en las membranas de las células del cerebro.

En la mujer embarazada, los niveles de DHA y EPA en sangre disminuyen durante el tercer trimestre de gestación, el período con la máxima acumulación de DHA en la membrana de las células cerebrales del feto. La concentración de DHA en la madre se normalizará al cabo de un año. Pero si no lo hiciera, sufrirá un mayor riesgo de depresión posparto. Tal riesgo se intensificará en las mujeres con embarazos seguidos, ya que las reservas maternas de DHA se van agotando. Sin embargo, los ensayos en los que se ha ofrecido un suplemento de DHA (antes o después del parto) no han demostrado la eficacia de este compuesto en la prevención de la depresión posparto.

Los distintos estudios dan a entender que la alteración del metabolismo de los omega 3 o un aporte insuficiente de alimentos que contienen sus precursores aumentaría la vulnerabilidad al estrés y, a largo plazo, a la depresión. Por el contrario, mantener un nivel óptimo de omega 3 con una alimentación variada y equilibrada favorecería una buena gestión del comportamiento ante el estrés. Desde el punto de vista terapéutico, los datos obtenidos ofrecen perspectivas interesantes en el tratamiento de la depresión, esto es, con suplementos ricos en omega 3 y fármacos que aumenten la síntesis de fosfolípidos.

¿CÁPSULAS DE OMEGA 3?

Los ácidos grasos son constituyentes importantes de nuestra alimentación y desempeñan una función esencial en el organismo. Varias investigaciones han confirmado que los omega 3 reducen las enfermedades coronarias y mejoran el estado de algunas personas con depresión. Harán falta nuevos estudios para definir mejor sus indicaciones. De todos modos, las personas que gozan de buena salud deben dar prioridad a una alimentación variada, en la que abunden los aceites vegetales (colza y nogal, entre otros) y el pescado. En cuanto a las personas depresivas, una alimentación «normal» no permitirá alcanzar el suministro aconsejado para obtener un efecto terapéutico: por lo menos 70 gramos de sardinas o 500 gramos de bacalao fresco al día. En estas condiciones, se hace necesaria la prescripción de cápsulas de «omega 3 terapéutico». Por último, la solución en el futuro quizá se halle en alimentos enriquecidos en omega 3 (a partir del lino o de microalgas, por ejemplo), que se podrían convertir en sustitutos del pescado.

PARA SABER MÁS

Omega-3 fatty acids and rodent behavior. I. Fedorova y N. Salem en *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*, vol. 75, págs. 271-289, 2006.

Altered expression of key dopaminergic regulatory proteins in the postnatal brain following perinatal n-3 fatty acid dietary deficiency. F. Kuperstein et al. en *Journal of Neurochemistry*, vol. 106, págs. 662-671, 2008.

Acides gras et risque cardio-vasculaire. J.-M. Lecerf en *Médecine et Nutrition*, vol. 45, n.º 2, págs. 1-25, 2009.

Omega-3 polyunsaturated fatty acids and depression: a review of the evidence. R. Liperoti et al. en *Current Pharmaceutical Design*, vol. 15, págs. 4165-4172, 2009.

N-3 fatty acids and cardiovascular events after myocardial infarction. D. Kromhout et al. en *New England Journal of Medicine*, vol. 363, n.º 21, págs. 2015-2026, 2010.

Omega-3 fatty acids and depression: from cellular mechanisms to clinical care. M. Freeman y M. Rapoport en *Journal of Clinical Psychiatry*, vol. 72, págs. 258-259, 2011.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik**
son profesores de física en la Universidad
Pierre y Marie Curie de París.



Alto a los malos olores

Algunos materiales de carbono pueden capturar las sustancias volátiles y combatir con eficacia los malos olores

Hay olores de los que parece imposible desembarazarse. Uno de los ejemplos más persistentes nos lo proporciona el humo del tabaco, si bien desde hace unos años se comercializan cabinas antihumo para que fumadores y no fumadores puedan reunirse sin que los segundos se sientan molestos y la vestimenta no acabe oliendo a tabaco frío. ¿A qué se debe la tenacidad de ciertos olores? ¿Cómo combatirla?

Nuestro sentido del olfato reacciona de una manera u otra en función de la sustancia a la que se enfrente. Al entrar en contacto con los cilios olfativos de la mucosa nasal, las moléculas odoríferas desencadenan una cascada de reacciones biomoleculares que desembocan en la percepción de un olor. Como ocurre con la mayoría de nuestros sentidos, por debajo de cierto umbral no advertimos nada. Después, la intensidad de la sensación aumenta de manera proporcional al logaritmo de la magnitud del estímulo. En el caso del olfato, este consiste en la concentración de compuestos odoríferos en el aire. Esa relación general, conocida como ley de Stevens, abarca comportamientos muy diversos.

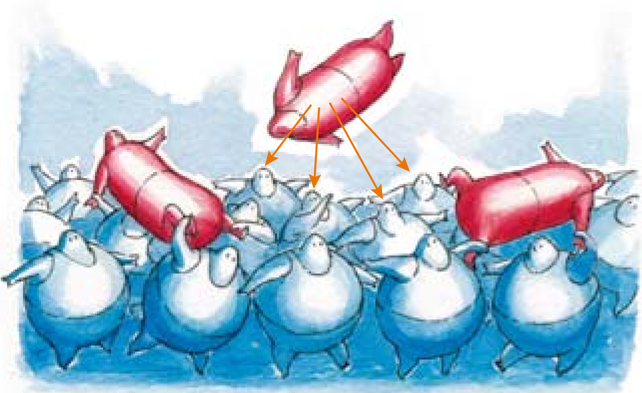
Comparemos dos casos extremos: el nitrobenceno y el fenol. Cuando la concentración de nitrobenceno, que posee un fuerte aroma a almendra, se reduce a la décima parte, la disminución de la intensidad olfativa percibida es la misma que cuando dividimos por 10.000 la concentración de fenol, de tufo alquitranado. Eso explica la rapidez con la que desaparece el olor a nitrobenceno, frente a la persistencia del fenol. Además, sus umbrales de percepción resultan muy diferentes. El metilmercaptano, con un característico olor a col, lo detectamos aun cuando su concentración asciende a una molécula por mil millones de moléculas en el aire. Para el sulfuro de hidrógeno, causante del hedor a huevo podrido, el umbral se encuentra en diez moléculas por mil millones. Y para la acetona, en diez por millón. Por tanto, para eliminar según qué tipo de olores habremos de hacer frente a objetivos muy distintos desde el punto de vista cuantitativo.

Incrustaciones indeseables

Pero en un olor rara vez interviene un compuesto puro. El humo del tabaco contiene más de 500 compuestos químicos, como nicotina, sustancias irritantes (fenoles, ácidos orgánicos u óxidos de nitrógeno) y alquitranes cancerígenos (hidrocarburos policíclicos, ésteres y fenoles). Consta en un 95 por ciento en masa de una fase gaseosa. El 5 por ciento restante se encuentra formado por partículas líquidas y sólidas, las cuales se vaporizaron durante la combustión del tabaco y luego se condensa.



El 95 por ciento del humo del tabaco corresponde a sustancias gaseosas. El 5 por ciento restante se compone de partículas microscópicas líquidas o sólidas (*rojo*). Estas son arrastradas por el aire en movimiento y se depositan al contacto con una superficie. Dado que contienen alquitranes poco volátiles, quedan incrustadas en las fibras textiles por períodos prolongados.



La adsorción de moléculas sobre una superficie se debe a las fuerzas intermoleculares de Van der Waals, de naturaleza electrostática. Entre dos moléculas aisladas, dichas interacciones son débiles. En cambio, entre una molécula (*rojo*) y una superficie (*azul*), el cúmulo de fuerzas (*flechas*) basta para retener la molécula.

BRUNO VACARO



El carbón activo es un material extremadamente poroso, por lo que la superficie activa por unidad de volumen resulta muy elevada. Un gramo de material (unos dos centímetros cúbicos) cuenta con una superficie del orden de 1000 metros cuadrados, el equivalente a un campo de fútbol. A ello se debe su elevada capacidad de adsorción.

BRUNO VACARO

Un centímetro cúbico de humo contiene entre 2000 y 3000 millones de pequeñas gotas, cada una con un diámetro comprendido entre 0,1 y 0,8 micrómetros. Diez veces menores que los granos de polen más pequeños, esas gotitas poseen un tamaño cercano al de la longitud de onda de la luz visible, lo que confiere al humo su tinte azulado. Un tamaño tan minúsculo conlleva un tiempo de sedimentación de más de un minuto. Además, las partículas de humo son arrastradas por el aire en movimiento y no se depositan sobre una superficie a menos que entren en contacto con ella. Se incrustan con facilidad en muebles, paredes y tejidos, puesto que, además de los compuestos ya citados, contienen una elevada proporción de alquitranes. Estos, al ser poco volátiles, tardan largos días en evaporarse, tiempo durante el que van liberando poco a poco a la atmósfera sustancias odoríferas, irritantes y tóxicas.

Adsorber para absorber el olor

¿Cómo luchar contra esos compuestos de propiedades físicas y químicas tan diversas? Algunas recetas de la abuela recomiendan encender una vela. Aunque tal medida pueda ejercer algún efecto sobre nuestra percepción del olor, no elimina los compuestos tóxicos; es más, la misma vela puede añadir otros nuevos. Nuestro objetivo requiere, pues, medidas más drásticas.

Primero hemos de eliminar las partículas en suspensión. Para ello, resulta indispensable ventilar el ambiente con un filtro muy fino. Luego debemos eliminar todos los compuestos contaminantes, ya sea destruyéndolos, modificándolos químicamente o confinándolos. Las dos primeras soluciones requieren aparatos complejos y voluminosos, propios de las instalaciones industriales. Sin embargo, existe una solución sencilla y eficaz para capturar compuestos químicos molestos: la adsorción.

Dicho método consiste en apresar las moléculas sobre una superficie aprovechando las interacciones electrostáticas que median entre moléculas neutras, conocidas como fuerzas de Van der Waals. Entre dos moléculas aisladas, dicha fuerza resulta mucho menor que las que median en los enlaces químicos; decrece muy rápidamente con la distancia y no permite ligar dos moléculas. Sin embargo, cuando una molécula se encuentra cercana a una superficie, experimenta la suma de las fuerzas que sobre ella ejercen todas las moléculas que componen la superficie. La energía de ligadura puede entonces alcanzar algunas décimas de electronvoltio. Esa cantidad resulta unas diez veces mayor que la energía cinética que posee una molécula a temperatura ambiente; por tanto, las fuerzas de Van der Waals bastan para fijar la molécula a la superficie.

Dado que la sección de una molécula suele ser del orden de un nanómetro cuadrado, se requerirían unos 100.000 metros cuadrados para adsorber un mol ($6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas), lo que equivale a algunas decenas o centenas de gramos, dependiendo de la especie. ¿Cómo desplegar superficies tan vastas en volúmenes razonables? La respuesta nos la proporcionan los materiales porosos, como el carbón activo.

Estos adsorbentes se caracterizan por su elevada porosidad (presentan una densidad inferior a 0,5 gramos por centímetro cúbico, con poros de entre una fracción de nanómetro y el micrómetro) y una gran superficie activa, del orden de 1000 metros cuadrados por gramo de material. Este suele encontrarse en estado granular, si bien hoy se desarrollan preparados como fibras, espumas o membranas, los cuales ofrecen velocidades de adsorción más elevadas. El carbón activo —que puede obtenerse carbonizando fibras de coco a alta temperatura— presenta, además, otra ventaja: ejerce unas interacciones de Van der Waals relativamente intensas. El material se emplea desde hace tiempo en máscaras antigás y otros sistemas de filtrado, así como en trajes protectores, o vendajes para heridas malolientes.

Cuando se hace pasar un gas contaminado a través de carbón activo, este adsorbe casi todos los componentes. Solo se filtran las moléculas que componen el aire puro, aquellas de masa molecular baja (como el amoníaco) y algunos compuestos sulfurados. El material cuenta con una capacidad de captura considerable, por lo que su vida útil en régimen no intensivo asciende a varios días o incluso semanas. Después, basta con cambiar el cartucho.

Para usos que requieran un rendimiento mayor, el material puede regenerarse inyectándole vapor: si bien basta para retenerlos en la superficie bajo condiciones normales, la energía de ligadura de los componentes no resiste el flujo del vapor ni su temperatura, que puede alcanzar las centenas de grados.

PARA SABER MÁS

Odeurs et désodorisation dans l'environnement. G. Martin y P. Laffort (coord.). Tec & Doc Lavoisier, 1991.
Pollutions olfactives. Colectivo ADEME. ADEME-Dunod, 2005.

por Agustín Rayo

Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Es especialista en filosofía de las matemáticas y filosofía del lenguaje.



Ordenadores y números naturales

Cómo demostrar el teorema de Gödel a partir de la complejidad de Kolmogórov

Todos nosotros estamos familiarizados con la aritmética: el estudio de los números naturales y sus dos operaciones básicas, la suma y la multiplicación. Pero ¿cuán complejo es el conjunto de las verdades aritméticas? ¿Sería posible programar un ordenador para que anunciase, una por una, todas las verdades de la aritmética sin formular jamás una falsedad? Dado que existe un número infinito de verdades aritméticas, nuestra computadora nunca completaría su tarea, sino que debería trabajar por toda la eternidad. Pero este detalle no nos preocupa: nos conformamos con que toda verdad aritmética sea anunciada por nuestro ordenador en algún momento.

Para llevar a cabo semejante proyecto, lo primero que hemos de decidir es el lenguaje que queremos que utilice nuestro ordenador para anunciar sus resultados. Supongamos, por ejemplo, que ese lenguaje contiene los símbolos 0 y 1 para nombrar el cero y el uno, y los símbolos + y × para denotar la suma y la multiplicación. Esto nos basta para nombrar todos los números naturales: el número dos puede representarse por medio de la expresión 1 + 1 (o por su abreviación, 2), y así sucesivamente. Si introducimos el símbolo = para designar la identidad entre números, nuestro lenguaje podrá también expresar verdades matemáticas simples, como $2 \times 1 = 1 \times 2$.

Hasta ahora, sin embargo, no podemos formular *generalidades*. Este lenguaje no nos permite expresar que, *para cualesquiera* números a y b, el producto de a por b es igual al de b por a. Introduciremos por tanto el símbolo ∀, que significa «para todo», y también variables como a y b. Gracias a ellos, ahora sí podemos expresar la conmutatividad de la multiplicación:

$$(\forall a)(\forall b)(a \times b = b \times a);$$

es decir, «para todo número a y para todo número b, a multiplicado por b es igual a b multiplicado por a».

Definamos, por último, los símbolos ~ y & para denotar la *negación* y la *conjunción*, respectivamente. Esto nos facultará para formular enunciados como ~(1 = 2), «no es el caso que uno sea igual a dos», o:

$$(\forall a)\big((a + 0 = a) \,\&\, (a \times 0 = 0)\big),$$

«para todo número a, a más cero es a, y a multiplicado por cero es igual a cero».

A pesar de su sencillez, nuestro lenguaje goza de un poder expresivo formidable. Nos permite, por ejemplo, formular enunciados *existenciales*, como «existe un número que resulta de dividir 12 entre 4»:

$$\sim(\forall a)\sim(4 \times a = 12).$$

Y no solo eso. Podemos formular también enunciados *condicionales*. «Si el resultado de multiplicar un número consigo mismo es uno, entonces dicho número es uno» se expresaría como:

$$(\forall a)\sim\big(a \times a = 1 \,\&\, \sim(a = 1)\big).$$

Las propiedades anteriores implican que nuestro lenguaje es capaz de capturar proposiciones aritméticas bien interesantes, como «hay infinitos números primos», o «no existen números a, b y c tales que $a^3 + b^3 = c^3$». De hecho, es tan poderoso que podemos enunciar todos los resultados fundamentales de la aritmética. El lenguaje nos permite incluso describir el funcionamiento de ciertos programas de cómputo. Contiene, por ejemplo, una fórmula $\Phi(n, m)$ que es verdadera si y solo si el n-ésimo programa de C++ (de acuerdo con algún orden canónico) se detiene tras haber impreso una secuencia de exactamente m unos.

Verdades y mentiras

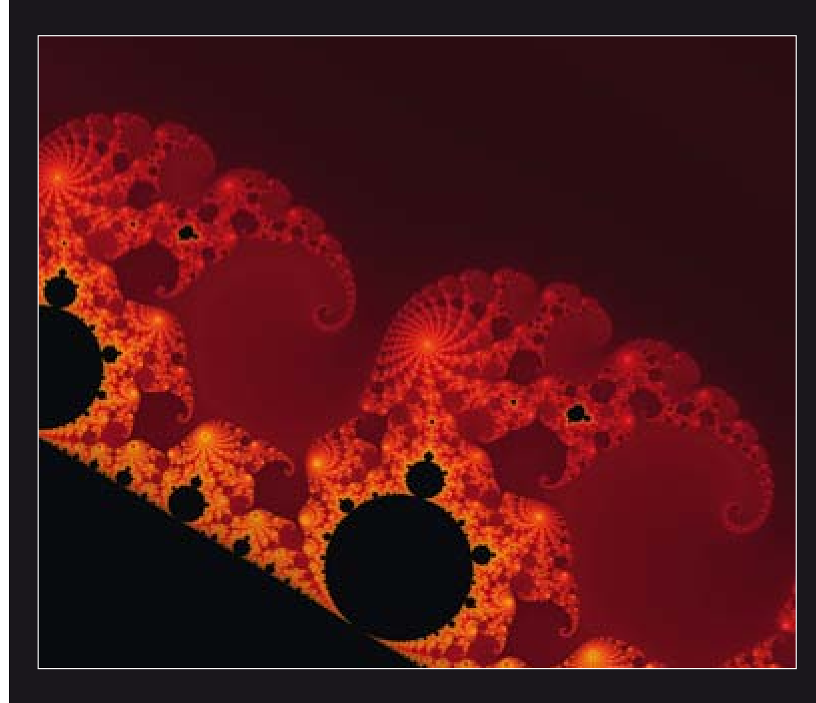
La riqueza expresiva del lenguaje que hemos construido convierte nuestro proyecto en algo fascinante. Si pudiéramos programar un ordenador para que enumerase todas las verdades que nuestro lenguaje es capaz de enunciar (y ninguna falsedad), habríamos conseguido concentrar un enorme tesoro de conocimiento matemático en una lista finita de líneas de código de programación. Implícita en nuestro programa se encontraría no solo toda la aritmética que aprendimos en la escuela, sino también la solución a problemas matemáticos muy complejos, como el teorema de Fermat, y las respuestas a otros aún sin resolver, como la conjetura de Goldbach.

Por desgracia, nuestro proyecto está abocado al fracaso. En 1931, el gran matemático austríaco Kurt Gödel demostró que la única manera de que un programa de cómputo consiga enumerar todas las verdades matemáticas es que la lista de enunciados incluya también alguna falsedad. Cuarenta años después, el matemático argentino-estadounidense Gregory Chaitin descubrió un nuevo método para demostrar el resultado de Gödel. La belleza de la prueba de Chaitin radica en su sorprendente sencillez.

En primer lugar, necesitamos definir el concepto de *complejidad de Kolmogórov* de un número natural. Diremos que un programa de cómputo *genera el número n* si imprime una secuencia de exactamente n unos y se detiene. La complejidad de Kolmogórov de un número (relativa a un cierto lenguaje de programación; C++, pongamos por caso) viene dada por el número de símbolos que contiene el programa más corto (de C++) que genera n.

El lenguaje que antes construimos nos permite definir una expresión, que denotaremos por $K(n)$, con la siguiente propiedad: para todo n y m, el enunciado $K(n) = m$ es verdadero si y solo si la complejidad de Kolmogórov de n es m.

Consideremos ahora un número natural G lo suficientemente grande (el significado preciso de «suficientemente grande» quedará claro más adelante). Sabemos que debe existir al menos un número n tal que el enunciado $K(n) > G$ sea ver-



Esta imagen del fractal de Mandelbrot consta de unos 7,7 millones de píxeles, a cada uno de los cuales se le ha asignado un color de entre 24 tonalidades posibles. Sin embargo, para producir esa enorme cantidad de datos, bastan unas pocas líneas de código de programación. Las reglas que generan el fractal de Mandelbrot son pocas y muy simples, por lo que decimos que su *complejidad algorítmica* es baja. En general, la *complejidad de Kolmogórov* de un resultado se define como el número de símbolos que posee el programa de computación más corto capaz de generar dicho resultado. Este concepto permite demostrar de manera sorprendentemente sencilla el primer teorema de incompletitud de Gödel.

Algunos autores han relacionado la complejidad de Kolmogórov con la sensación de belleza: entre varios objetos similares, encontramos más bello aquel cuya complejidad algorítmica es menor. Ello explicaría el placer estético que embarga a los matemáticos cuando advierten la simplicidad que subyace la demostración de todo gran teorema.

dadero. (Esto se sigue del hecho de que existen infinitos números naturales, pero no hay más que un número finito de programas de cómputo con G símbolos o menos.) Por tanto, si lográsemos construir un programa de cómputo P que enumerase todas las verdades aritméticas, P debería anunciar al menos un enunciado de la forma $K(n) > G$.

Sea z el número natural correspondiente al primer enunciado de esa forma anunciado por P: $K(z) > G$. La complejidad de Kolmogórov de z no puede ser mucho mayor que el número de símbolos que contiene P. La razón es muy sencilla. Imaginemos que queremos escribir un programa de cómputo que genere z. Una manera de hacerlo consiste en introducir una pequeña modificación en P: en lugar de pedir al programa que anuncie verdades matemáticas conforme las vaya identificando, le ordenaremos que trabaje en silencio hasta que encuentre algún enunciado de la forma $K(n) > G$ y que, en ese momento, imprima una secuencia de exactamente n unos y se detenga. Dado que, por hipótesis, el primer enunciado de esa forma que identificará P es $K(z) > G$, el programa modificado imprimirá una secuencia de exactamente z unos y se detendrá.

Para transformar el programa original de la manera descrita, necesitaremos introducir algunos símbolos adicionales. Sin embargo, no hará falta añadir muchos. En primer lugar, habremos de decirle al programa cuál es el número G. Por otro lado, debemos darle la orden de que trabaje en silencio hasta que identifique un enunciado del tipo $K(n) > G$ y que, en ese momento, imprima una secuencia de n unos y se detenga. Introducir el número G en el programa requerirá, a lo sumo, $\log(G)$ símbolos adicionales. (Ello se debe a que un número m siempre puede representarse por una secuencia de $\log(m)$ dígitos.) Implementar la orden mencionada requerirá un número fijo C de símbolos adicionales, el cual no depende de cuán grande sea G. Por tanto, el programa modificado constará de un número de símbolos no mayor que:

$$|P| + \log(G) + C,$$

donde $|P|$ denota el número de símbolos del programa original.

Dado que el programa modificado genera z, sabemos que:

$$K(z) \leq |P| + \log(G) + C.$$

Sin embargo, siempre que G sea lo suficientemente grande, podremos concluir que:

$$|P| + \log(G) + C < G.$$

Esta última desigualdad se debe a que, mientras que $|P|$ y C son constantes, los números naturales crecen mucho más rápido que sus logaritmos. A partir de las dos últimas desigualdades, se sigue que $K(z) < G$ y, por tanto, que *el enunciado* $K(z) > G$ *ha de ser falso*.

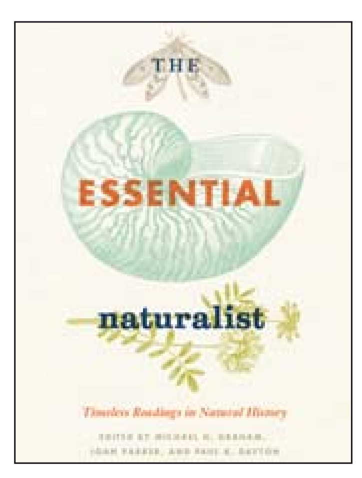
Se trata de una noticia terrible. Habíamos supuesto que P anunciaría que $K(z) > G$ como parte de su tarea de enumerar todas las verdades matemáticas (y ninguna falsedad). Pero si, tal y como acabamos de concluir, $K(z) < G$, entonces nuestro programa habrá enunciado una falsedad.

Lo que ha ocurrido es lo siguiente. Empezamos demostrando que, para que P enumerase todos los enunciados verdaderos expresables en nuestro lenguaje, tendría que producir en algún momento un enunciado de la forma $K(z) > G$. Sin embargo, después fuimos capaces de probar que el primer enunciado de esa clase que emita el programa ha de ser falso. Nuestro sueño era una quimera: resulta imposible escribir un programa que enumere todos y solo los enunciados verdaderos de nuestro lenguaje aritmético.

PARA SABER MÁS

Hay una buena discusión de los teoremas de incompletitud de Gödel en Wikipedia: **es.wikipedia.org/wiki/Teoremas_de_incompletitud_de_Gödel**

La demostración de Chaitin, junto con una prueba relacionada del segundo teorema de incompletitud de Gödel, puede encontrarse en un artículo de Shira Kritchman y Ran Ra: **The surprise examination paradox and the second incompleteness theorem,** *Notices of the AMS*, vol. 57, n.º 11, 2010. **www.ams.org/notices/201011/rtx101101454p.pdf**



THE ESSENTIAL NATURALIST. TIMELESS READINGS IN NATURAL HISTORY.

Dirigido por Michael H. Graham, Joan Parker y Paul K. Dayton. The University of Chicago Press; Chicago, 2011.

Historia natural

¿Una necesaria vuelta a la visión de conjunto?

La biología se subdivide hoy en un mosaico de disciplinas, de la microbiología a la ecología pasando por la genética, biología molecular, evolución, taxonomía, paleontología, fisiología, zoología, botánica, etcétera. Todos esos dominios se ramifican desde un tronco común, la historia natural. En una sociedad científica de hiperespecialización, la visión de conjunto sigue manteniendo su poder de sugerencia. Naturalista se autodefinía el introductor de la teoría de la información en ecología, Ramón Margalef.

La atracción del hombre por la naturaleza le ha acompañado a lo largo de su historia. Se trate de buscar recursos para la supervivencia, promover el comercio o estimular los sentidos, necesitaba conocer el desenvolvimiento de los organismos en su medio. Desde las pinturas de abrigos y cavernas, los primeros trazos se aplican a la descripción de la naturaleza viva. Los balbuceos pictográficos evolucionaron, andado el tiempo, hacia técnicas de identificación de los organismos, sistemas de clasificación y modelos de sus interrelaciones. Todos esos objetivos los cubría antaño la historia natural. Con esta tiene contraída la ciencia contemporánea una deuda impagable. Sobre sus hombros avanzó, si recurrimos a la famosa expresión de Bernard de Chartres. Unos conocidos (Charles Darwin, Henry Bates, Alfred Wallace y Alfred Wegener), otros menos (William Dampier o Henry N. Moseley), sus hipótesis se asientan sobre observaciones fundamentales de muchos que les precedieron.

Es de lamentar la ausencia de textos de los naturalistas españoles, que, sabido es, sirvieron a Darwin para tejer su doctrina. En esta selección se honra a William Dampier (1652-1715), bucanero y naturalista a un tiempo, cuyos apuntes aportaron información valiosa para la ecología y la biología de la evolución. Al relatar su viaje a las Galápagos describe el comportamiento de las grandes tortugas marinas. En la obra de Darwin y Wallace influyó en particular Alexander von Humboldt, quien formó equipo con Aime Bonpland. Sus descubrimientos de corrientes (tal la corriente de Humboldt) y sus mapas detallados de ríos y afluentes de América del Sur ayudaron a poner las bases de la biogeografía. Prestó una curiosa atención a la electricidad animal en su ensayo sobre las anguilas eléctricas. En esa estela, Henry N. Moseley registró numerosas observaciones sobre fauna y flora en su viaje alrededor del mundo a bordo del *Challenger*, de 1862 a 1876. Aunque muchas observaciones pioneras no se publicaron nunca; así, los trabajos de Beatrix Potter sobre la relación simbiótica entre algas y hongos. En 1897 Potter se encontraba en la avanzadilla de la investigación sobre líquenes. Su ensayo «On the germination of the spores of Agaricineae» fue leído por George Masse (no se permitía la presencia de mujeres) en la reunión de la Sociedad Linneana de Londres correspondiente al año 1897. El fuego devoró el manuscrito.

No está mal escogida como representante del naturalista medieval la figura del emperador Federico II (1194-1250), rey de Sicilia, Chipre y Jerusalén, políglota, mecenas de las artes, matemáticas y ciencia. Desempeñó un papel clave en la introducción de la ciencia árabe en Occidente. Su tratado sobre cetrería supuso un hito, al reseñar las relaciones entre depredadores y presas. «Las aves, lo mismo que los demás animales, pueden dividirse en especies de acuerdo con sus relaciones sexuales, nacimiento, métodos de procuración de alimento, distribución a lo largo de las estaciones del año... y su cambio en la dieta», dejó escrito. Dando un salto de varios siglos, no tenía especial preparación el comerciante Anthony van Leeuwenhoek (1632-1723), quien a través de la instrumentación creada por él nos llevó al descubrimiento de un mundo nuevo: el de lo infinitamente pequeño.

El naturalista moderno procede con su guía de campo, su red, sus binoculares, preparado para identificar cuanto observa o atrapa. Es la tradición que se remonta a John Ray o Carl Linné, que describieron y sistematizaron las especies. En escala modesta, fue paradigmático el trabajo de Gilbert White (1720-1793), que destacó por registrar las observaciones realizadas durante muchos años en un mismo lugar, Selbourne, un pueblecito del sur de Inglaterra. White vivió allí unos cincuenta años, durante la parte más intensa de la pequeña edad del hielo. Testigo de cambios a corto y a largo plazo y de los efectos de unos inviernos durísimos, comprobó la disminución de comunidades y especies con la pérdida de sus fuentes de alimentación.

Avisaba Wallace, en 1857, que había que identificar y describir con precisión cada nueva especie descubierta. Todas importaban para entender la evolución. El mundo de los insectos subyugan a Jean Fabre (1823-1915), un autodidacta que vivió una vida obscura en la Francia rural. En *La sabiduría del instinto* hallamos una fina descripción de la caza de una avispa del Languedoc, que «lanza su lanceta repetidamente contra el tórax del grillo para dañar sus ganglios nerviosos». Emmett R. Dunn vive, en *The Salamanders of the Family Plethodontidae*, publicada en 1926, la experiencia de quien se encuentra un primer espécimen gigante de *Desmognathus quadra-maculatus* y el comportamiento de una *gutto-linneata* encaramada en un arbusto y asustada por la luz de la linterna.

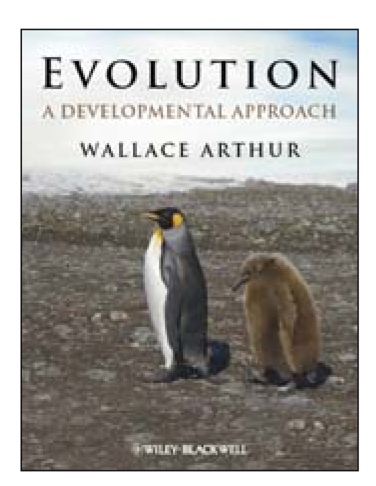
Antológica es también la descripción que realiza en 1927 Edward H. Forbush sobre el búho virginiano, la más morosa, salvaje y saturnina de las aves de Nueva Inglaterra. En su presencia veían los indios la personificación del mal y el advenimiento de un desastre. Ave nocturna, no rehuye hábitos diurnos y emigra para evitar la hambruna. Como leemos en los *Comentarios sobre los cefalópodos encontrados en el estómago de una ballena* (1913), el príncipe Alberto de Mónaco se percató de la importancia del contenido estomacal, pues se trataba de cefalópodos que vivían a grandes profundidades, desconocidos hasta entonces. Previene John Crompton en *Las arañas lupinas*, aparecido en 1954, contra la tentación de generalizar; él se concentra en la vida de *Lycoisa narbonnensis*, una tarántula negra, que, alcanzada la madurez, vive en un agujero defendido por un parapeto,

desde donde observa su territorio de acción. A la manera del guepardo, resalta, combina velocidad y golpe certero.

Un recuento caleidoscópico ofrecía en 1938 George E. MacGinitie en sus *Notas sobre la historia natural de algunos animales marinos*. Advierte que las esponjas tienen pocos enemigos; los nudibranquios son sus principales depredadores. Tras un repaso por los celenterados, se fija en los *Echiuroidea*. Los huevos y espermatocitos de *Urechia caupo* se almacenan en seis órganos segmentales; la eclosión ocurre durante la primavera o comienzos del verano, al subir la temperatura del agua. El examen de las heces del anélido *Chaetopterus variopedatus* pone de manifiesto que contiene larvas de pelecípodos.

En 1951 Edward Wilson sufrió los efectos de la invasión, en el sudeste estadounidense, de hormigas rojas de la especie *Solenopsis invicta*, procedentes de América del Sur. Al estudiarlas, se percató de la nueva variedad de hormiga roja, cuantificó la pauta geográfica del grupo, su tamaño y color, e infirió sus mecanismos genéticos a partir de esas observaciones y de experimentos de laboratorio; más tarde se comprobó que habían sido dos especies las invasoras. La historia natural, subrayaba tras su propia experiencia, podía ser de interés general y de uso práctico. Joseph Cornell presenta, en 1954, un trabajo de campo modélico sobre el conejo del chaparral de California (*Sylvilagus bachmani*). Colocó 2251 trampas, marcó y recogió datos de cuarenta ejemplares (tamaño, género, condición reproductora, parásitos externos y sanguíneos), amén de examinar las heces. Describe la vegetación de la zona. Y se pregunta sobre la posibilidad de darle una mayor generalidad a los datos obtenidos.

Más de veinticinco años pasó Charles Elton absorbido en el estudio de los Wytham Woods hasta alcanzar un cuadro general que sirviera de modelo de la investigación sobre comunidades. Había abierto el primer surco en esa dirección Forbes, quien en 1925, publicó *El lago como microscosmos*, una notable síntesis sobre interacciones tróficas. Los ecólogos marinos consideran el oleaje una de las variables físicas principales. Una historia subyugante esta protagonizada por miles de naturalistas. —*Luis Alonso*



EVOLUTION. A DEVELOPMENTAL APPROACH,

por Wallace Arthur. Wiley-Blackwell; Oxford, 2011.

Evo-Devo

Visión estructurada de conjunto

Ha nacido con buen pie el primer libro generalista sobre la evolución centrada en el organismo en desarrollo. Con perspectiva filogenética, *Evolution* se propone esclarecer de qué modo opera la evolución en el transcurso del desarrollo embrionario y postembrionario. A esa evolución contemplada desde el prisma de la biología del desarrollo se la conoce por *evo-devo*. Una materia que pone el énfasis en las pautas de desarrollo, adaptación y coadaptación, coopción génica, plasticidad del desarrollo y origen de las innovaciones evolutivas y planes corporales, sin dejar de lado los cambios introducidos en los organismos a lo largo de la evolución de las especies y taxones superiores. Escasos decenios atrás, se vinculaba todavía la evolución al cambio operado en las frecuencias génicas de una población. Pero la evolución no implica solo modificaciones poblacionales, sino también en otros niveles, siendo el organísmico el más importante. Diferimos de nuestros primates no humanos, los chimpancés, en estructuras y facultades superiores, además de la genética.

La teoría de la evolución, establecida por Charles Darwin hace más de 150 años, y en permanente estado de revisión, expone que los organismos han venido a la existencia por procesos naturales; en particular, por la variabilidad heredable y la selección natural. La variabilidad heredable incluye también los procesos de desarrollo a través de los cuales se produce la variabilidad fenotípica. Pero Darwin erró en la genética, con su adhesión a la doctrina de la pangénesis, y no pudo entender el mecanismo causal a través del cual el óvulo fecundado se convertía en adulto. El avance en el conocimiento de la genética y de la biología del desarrollo consolidaron la tesis darwinista y ampliaron el horizonte de la selección natural. La fuerza que adquiere en la evolución la biología del desarrollo se ha ido viendo con nitidez creciente; en efecto, describe las formas en que la evolución puede y no puede producir un tipo de animal o planta a partir de otro. Lo vemos plasmado en los árboles filogenéticos. La evolución no puede producir directamente un nuevo tipo de adulto a partir de otro, sino que procede mediante alteración, a lo largo de varias generaciones, de la trayectoria de desarrollo desde el óvulo fecundado hasta el estado adulto. Para conformar una explicación evolutiva no basta ya con detallar diferencias de adaptación (*fitness*) reflejadas en cambios demográficos; se requiere llegar hasta las diferencias de desarrollo sobre las que opera primero la selección. En el siglo y medio transcurrido se habían ido elaborando y estableciendo, en efecto, varios postulados; entre ellos, que todos los estadios del desarrollo del ciclo biológico de los organismos podían cambiar en el curso de la evolución y que no había una forma universal de evolución del desarrollo.

Las diferencias en el desarrollo no pueden reputarse meras mutaciones. Una mutación es un cambio en la secuencia nucleotídica de un gen. Si el gen que muta provoca la modificación de la trayectoria del desarrollo, habrá que conocer cómo se produce. Además, las trayectorias del desarrollo pueden quedar también modificadas por factores externos; lo que se observa no solo en casos extremos (producción de machos o hembras en las tortugas en razón de la temperatura de incubación), sino también en fenómenos más sutiles, como las ligeras diferencias en la cantidad de asimetría izquierda-derecha (asimetría fluctuante) que puede ser resultado de la variación de la temperatura y otros factores ambientales. Al medio le corresponde un doble papel en la evolución: el de criba selectiva y el de producción de variabilidad. Cierto es que

la variabilidad no heredable, o plasticidad fenotípica, no puede contribuir a la evolución. Pero si los genotipos divergen en su explicitación fenotípica dada la variabilidad ambiental, es obvio que aportan material para el cambio evolutivo. En breve, lo que evoluciona no son animales o plantas adultos, sino ciclos biológicos enteros.

El desarrollo de cualquier animal o planta procede a través de una secuencia temporal de etapas más o menos definidas. Los mamíferos constituyen un ejemplo de desarrollo directo, el más simple. En los equinodermos, insectos y anfibios, en cambio, la ruta hacia el estadio adulto es indirecta; en oposición a las versiones en miniatura, da un rodeo a través de estadios inmaduros, radicalmente distintos del adulto. Algunas plantas, especies arbóreas sobre todo, y ciertos animales coloniales (así los briozoos), son de naturaleza modular, lo que significa que una fase importante del desarrollo se repite múltiples veces. Cada trayectoria o proceso de desarrollo que lleva a la aparición de un componente del organismo representa una ruta específica para una población celular. Las trayectorias pueden variar, en un mismo individuo (las hojas de un manzano no son todas iguales) y entre individuos de una misma población; lo segundo reviste mayor interés evolutivo. Cualquier proceso de desarrollo se considera en el tiempo y en el espacio. Constituye una pauta. Desde un nivel molecular se habla de pauta de expresión de un gen en un embrión; en el nivel de tejido hablamos de formación de patrones para indicar, por ejemplo, las distintas pautas de desarrollo de los cinco dedos de la mano. A los cambios en el tiempo y el espacio se les denomina heterocronía y heterotopía, respectivamente. A los cambios en la cuantía y tipo, heterometría y heterotipia.

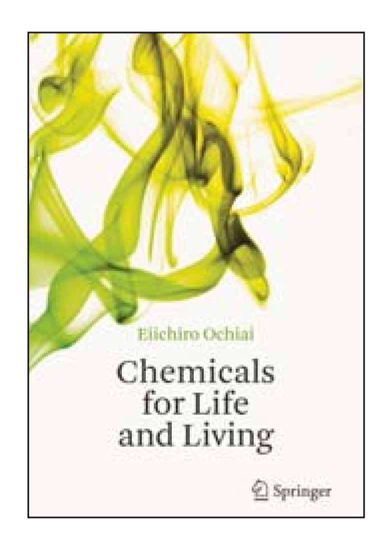
Cuestión básica en biología evolutiva es la concerniente a la multicelularidad. ¿Cómo surgieron animales, plantas, hongos, algas marrones y mohos? La investigación sobre los coanoflagelados nos ha revelado que estos organismos poseen muchos genes que antes se conocían solo en animales y asociados con la multicelularidad, como los que determinan las proteínas de adhesión y señalización celulares. Estas proteínas pudieron haber sido empleadas por los precursores unicelulares de los animales (y de los coanoflagelados actuales) para interaccionar con el entorno, incluidos los coespecíficos (parejas sexuales potenciales) y otras unicélulas (presas potenciales). Si así fuera, tendríamos caso palmario de exaptación, proceso por el que algo se seleccionó en el curso de la evolución para cumplir una función determinada y más tarde resultó ser útil (y, por ende, se seleccionó) para otra.

La doctrina del evo-devo tuvo un antecedente lejano en la ley de la recapitulación de Haeckel, de 1896: la ontogenia es la recapitulación de la filogenia. La serie de formas por las que pasa el organismo durante su progreso de célula fecundada al estadio de pleno desarrollo constituye una reproducción comprimida de la larga secuencia de formas por las que atravesaron los antepasados del organismo en cuestión.

En ese contexto preanunciador le había precedido, cuando sostuvo que los rasgos generales de un grupo extenso de animales aparecen en el embrión antes de que se presenten los rasgos específicos. A D'Arcy Thompson y su *On Growth and Form*, le debemos la teoría de las transformaciones. Los cambios operados en el desarrollo en el transcurso de la evolución no fueron cambios erráticos, en el sentido de que cada uno evolucionara por su cuenta, sino que constituyeron cambios coordinados en la forma del organismo. El proceso podía representarse visualmente mediante la proyección del perfil morfológico de un animal sobre una parrilla cartesiana y sometiendo luego la parrilla a distorsiones sistemáticas. Mas, pese al interés de Thompson en el desarrollo y la evolución, sus ilustraciones de las transformaciones evolutivas correspondían a adultos. Con todo, podemos extender la idea de la transformación a las últimas fases de la ontogenia, cuando empieza a predominar el desarrollo alométrico. Gavin de Beer publicó *Development and evolution* en 1930 (revisada con nuevo título, *Embryos and ancestors*, en 1940). Abordaba el cambio evolutivo en la cronología de los fenómenos del desarrollo, es decir, la heterocronía. Puso especial acento en la multitud de tipos de procesos heterocrónicos, subrayando la neotenia, retraso del desarrollo somático en relación con el desarrollo del sistema reproductor; en un linaje neoténico, lo que había sido forma juvenil (o incluso larvaria) pasa a ser forma madura reproductora. Richard Goldschmit buscó una interpretación evolucionista a las mutaciones homeóticas de *Drosophila*, mutaciones que causan la aparición de la estructura correcta en el lugar equivocado; atribuyó a tales mutaciones el origen de taxones superiores. Por su parte Conrad Hal Waddington ilustró las trayectorias del desarrollo en la metáfora de la canalización en un paisaje epigenético, donde el paisaje es como un sistema de afluentes, aunque con una topografía general inversa a la que caracteriza la geografía real: a medida que descendemos colina abajo, los ríos divergen en vez de converger. Lancelot Law Whyte defendía, en los años sesenta, la coadaptación interna, más allá de la adaptación externa a las condiciones ambientales. En 1977, Stephen Jay Gould publicó *Ontogeny and Phylogeny*. Antes de 1980 la mayoría de los estudios sobre evolución del desarrollo se centraban en el organismo; ninguno ahondaba hasta la estructura molecular de los grupos clave de genes del desarrollo; esta estructura no empezó a ser revelada hasta 1980. De las dos partes de que consta el libro de Gould, la primera es histórica («recapitulación»), en tanto que la segunda se centra en la heterocronía. Gould llega a la conclusión de que la recapitulación no queda descartada.

El avance más importante en biología, desde que Watson y Crick resolvieron la estructura del ADN en 1953 y el descerrajamiento consiguiente del código genético en los sesenta, fue el descubrimiento del homeobox en 1984. Esa caja corresponde a una secuencia de unos 180 pares de bases de ADN que se encuentra en muchos genes del genoma de cualquier animal, sea en su forma basal primitiva (esponjas) o un animal más adelantado y complejo (insectos, aves, etcétera). La secuencia homeobox, cuando se transcribe y traduce, muestra una secuencia de 60 aminoácidos de la proteína correspondiente. Esta sección de la proteína (homeodominio) posee propiedades de enlace con el ADN. Lo que guarda relación con la función de la proteína: pasar al núcleo celular, enlazarse con el ADN de distintos genes, activarlos o inactivarlos, regular su actividad. Las proteínas que contienen homeodominios ayudan a controlar los procesos de desarrollo a través de los cuales el óvulo fecundado se convierte en adulto. Además, los genes que contienen la homeobox, distribuidos por todo el reino animal, evidencian una base común, al margen de la forma adulta que termine por adquirir. Los genes MADS-box muestran una similar base común para el desarrollo de las plantas.

—Luis Alonso



CHEMICALS FOR LIFE AND LIVING,

por Eiichiro Ochiai. Springer Verlag, Berlín, Heidelberg, 2011.

Sustancias químicas para la vida y para vivir

Una perspectiva general de la química en la vida cotidiana para quienes ya saben química, o la habían sabido

Eiichiro Ochiai, profesor emérito de la Universidad de Maryland, en Pennsylvania, ha publicado diversos libros de química bioinorgánica y de bioquímica, y se ha interesado por todo tipo de temas relacionados con la ciencia —especialmente la química— y la vida cotidiana. Ha escrito más de 250 artículos cortos sobre un gran número de temas actuales, no solo científicos sino también sociales.

El libro que se comenta aquí ilustra perfectamente los eslóganes del Año Internacional de la Química (2011): «Todo es química», «La química lo es todo» y todas sus variantes. El título propuesto no acaba de ser una traducción exacta del original. Primero, el problema de traducir *Life and Living*: ¿«La vida y la vida»? ¿«La vida y el vivir»? ¿«La vida y la vivencia»? Y, luego, ese *Chemicals*. En inglés, el término *chemical* vale tanto para «sustancia química» como para «producto químico». En español, esta segunda acepción tiene una cierta connotación de artificialidad, por destacar que aquello ha sido producido. Por su parte, el término «sustancia» *química* puede suscitar en alguien la duda de si pueden existir «sustancias no químicas». Y no, como nos demuestra el libro. Toda materia, todo material, toda sustancia, todo producto, todo organismo, puede describirse en términos de la química, en términos de *chemicals*. Empieza a proliferar una horrible traducción de este último término, debido quizás al auge de los traductores automáticos. Sustantivan definitivamente el adjetivo y lo traducen por «químicos». Así, se pueden encontrar en el mercado desodorantes libres de químicos, e incluso urinarios sin químicos.

A partir de la afirmación de que no hay materia que no sea química, el libro recorre, en siete partes y veintidós capítulos, todo lo material, con mayor o menor detenimiento. En una primera parte trata de «Lo esencial para la vida», a partir de preguntas, algunas aparentemente alejadas de la química. ¿Por qué el agua de mar es azul? ¿De dónde procede el aire? ¿Por qué nos parecemos a nuestros padres? o ¿Qué provoca que algo sea sólido? La segunda parte se dedica a «Mejorar la salud humana». Se habla ahí de nutrición y de medicamentos: ¿Es el curry un agente anticancerígeno? ¿Qué son las píldoras anticonceptivas o la RU-486? La tercera parte, «Por una vida feliz», incluye temas tan dispares como los fuegos artificiales, la televisión en color, la cerámica, los nanotubos de carbono, los buckminsterfullerenos o los perfumes. La cuarta, «¿De qué están hechos la Tierra y el universo?», habla del origen de los elementos a partir de reacciones nucleares y, luego, de geoquímica. Cada uno de los capítulos cuenta con numerosos ejemplos recientes ilustrativos de la temática de que se trate, muy bien escogidos y con abundante ilustración.

Se dedica la parte quinta a «Los productos químicos que pueden provocar problemas: tóxicos, contaminantes y otros». Se trata ahí de las dioxinas, los disruptores endocrinos, el DDT, la toxina botulínica, las armas químicas y también las drogas (alcohol, nicotina, éxtasis o los anabolizantes esteroideos).

La sexta parte rompe con las cinco primeras. En treinta páginas da una visión global de los principios de la química con una perspectiva muy académica: átomos, moléculas, el mol, iones, enlaces y cambios de fase. Según una lógica estrictamente racional, este debería ser el primer capítulo del libro, pues su contenido resulta básico para la comprensión del resto. Pero, naturalmente, esta sería una lógica no adecuada para un libro de divulgación. De hecho, cabe contemplar este capítulo como un recordatorio de lo que el lector ya ha estudiado alguna vez. Un acervo que le ha permitido leer y comprender el libro, y que aquí se presenta como un resumen de química académica, no menos real que la anterior, pero más alejada de los productos y procesos cotidianos que se han ido describiendo.

El penúltimo capítulo responde a dos preguntas tan intrigantes como las siguientes: ¿Existen realmente los átomos y las moléculas? ¿Podemos verlos? Y responde que sí, naturalmente, basándose en técnicas como la microscopía electrónica, la difracción de rayos X y las microscopías de fuerzas atómicas. Por fin, una séptima parte con un último capítulo aborda brevemente temas controvertidos, no solo científicos sino también sociales: la alimentación *orgánica* o *biológica*, los productos derivados de organismos modificados genéticamente y los productos sintéticos en general. Son temas que el autor ha tratado en sus múltiples escritos de divulgación, y de los que aquí se da solo una pincelada concisa, pero apreciable.

El lenguaje del libro es químico. Hay que tener asumida y dominada la terminología básica, tanto la descriptiva (agua) como la de fórmula condensada (H_2O) o desarrollada (H-O-H) de todo tipo de moléculas, incluidos los polímeros o las macromoléculas bioquímicas, y la notación de las reacciones químicas de todo tipo. El libro está repleto de esquemas de reacciones, fórmulas complejas y fotografías o dibujos que representan moléculas o estructuras complejas. Muchos de los dibujos o esquemas son originales. Otros son tomados de referencias solventes clásicas o de artículos originales recientes. El autor demuestra así estar al día de la bibliografía general más reciente de todos los ámbitos de la química.

Se trata de un libro recomendable para quien quiera tener una descripción básica global del entorno —en sentido amplio— en términos químicos, y para el profesor de química de cualquier nivel que desee contar con una amplia colección de casos para ilustrar sus clases académicas con ejemplos más novedosos que los que se repiten hasta la saciedad en los libros de texto habituales.

—Claudi Mans
Universidad de Barcelona

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



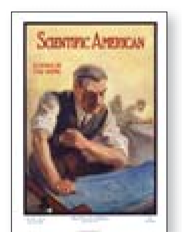
Abril 1962

Carrera espacial

«El éxito, el 20 de febrero, del primer vuelo orbital del proyecto Mercury habría preparado la escena para la cooperación internacional en la exploración del espacio, además de poner de manifiesto, mediante la actuación del astronauta John H. Glenn, Jr., que el hombre tiene una función que desempeñar en los vehículos espaciales. Glenn demostró ser capaz de gobernar la cápsula, al controlar el cabeceo, la guiñada y el balanceo tras los fallos de funcionamiento que se produjeron en el sistema automático a poco de iniciado el vuelo. Glenn afirmó después que su experiencia indicaba que un hombre podría hacerse cargo del control de los distintos sistemas. De hecho, sugirió que en el futuro se podría proseguir con vuelos considerablemente menos automatizados y complejos.»

Arsenales nucleares

«Resulta evidente que, en el debate de EE.UU. sobre si dar un paso decidido hacia el desarme nuclear, difícilmente primarán solo las razones militares. Así lo reconocen muchos en el país, donde los obstáculos al desarme se ven cada vez más como de carácter económico, político y emocional, en lugar de basarse en consideraciones de operatividad militar. Para EE.UU., un aspecto crítico del problema sería la repercusión que tendrían unas medidas de desarme drásticas, no solo sobre el conjunto de la economía, sino también sobre áreas especiales de industrias de alta cualificación, de base científica y muy localizadas, hoy profundamente implicadas en trabajos de defensa.»



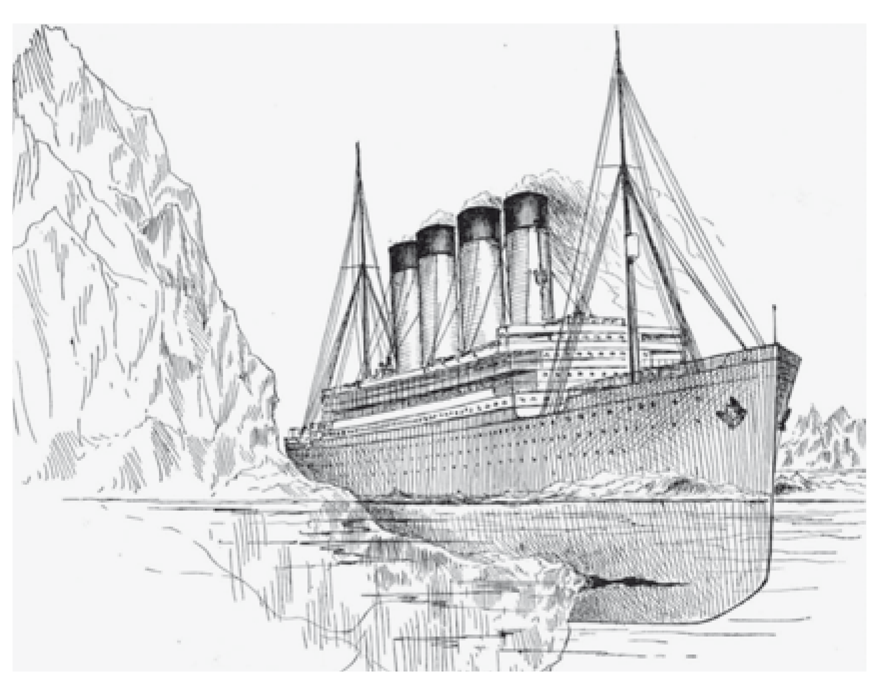
Abril 1912

Hundimiento del *Titanic*

«El domingo 14 de abril, el más grande y, supuestamente, el más seguro de los buques de vapor hoy en servicio, mientras navegaba con su rumbo correcto en una noche clara y estrellada, chocó con un iceberg y se hundió al cabo de pocas horas, arrastrando consigo al fondo a más de mil seiscientas almas. Tres son las lecciones técnicas que podemos extraer de tan abrumador desastre. Primera, que los arquitectos navales aún no saben cómo construir un buque absolutamente insumergible, y tal vez nunca lo consigan. Segunda, que si todos los barcos pueden hundirse, deberán llevar al menos un número suficiente de botes salvavidas para todas las personas a bordo hasta que otros buques, avisados por radio, lleguen a la escena del desastre. Tercera, que las rutas transatlánticas de los buques de pasajeros deben ser desplazadas hacia el sur lo suficiente para alejarlos por completo de las rutas de los hielos flotantes.»

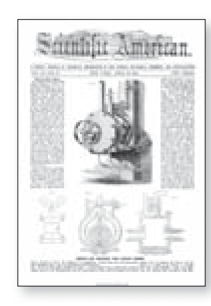
Dopaje sanguíneo

«Sir Edwin Ray Lankester ha preguntado a las autoridades suecas, responsables de los próximos Juegos Olímpicos, si se permitirá que los participantes en una maratón lleven un depósito o bolsa de oxígeno de la que inhalar de vez en cuando durante los cuarenta y dos kilómetros del recorrido de tan dura y agotadora carrera. ‘Como el oxígeno no es una droga, sino un artículo de consumo tan natural como el agua, no parece que haya razones para descalificar a un corredor que se refresque con él, como lo haría con sopa o agua.’ La propuesta de sir Edwin es asombrosamente acientífica para un científico de su reputación y, además, muy antideportiva.»



El *Titanic* ya sentenciado: una colisión de costado contra un iceberg abrió las planchas del casco en varios compartimentos del barco (la brecha no fue tan grande como muestra la ilustración).

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CVI, Nº 17; 27 DE ABRIL DE 1912



Abril 1862

Cañones y whisky

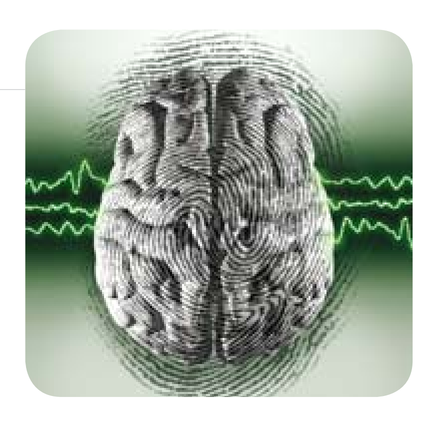
«En una reciente proclama, el gobernador Brown, de Georgia, ordena al pueblo del Estado que cese en la manufactura de aguardientes desde el 15 de marzo, so pena de que se requisen los alambiques para uso del Gobierno. La proclama concluye como sigue: «Necesitamos más cañones para enfrentarnos al enemigo. El bronce de cañón empleado en la fabricación de piezas de campaña se compone de noventa partes de cobre y diez de estaño. Los alambiques de cobre de Georgia, un arma mortífera que destruye a nuestra propia gente, si se emplearan para hacer cañones, nos proporcionarían muchas baterías de seis libras con que apuntar al enemigo.»

NEUROCIENCIA

Lo que hace único a cada cerebro

Fred H. Gage y Alysson R. Muotri

¿Cómo es posible que gemelos idénticos crezcan con personalidades distintas? En las neuronas, ciertos genes se desplazan de un sitio a otro y alteran la forma en que estas desempeñan su trabajo.



TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

La Red en la sombra

Julian Dibbell

Los Gobiernos y las grandes compañías tienen más control que nunca sobre Internet. Se está desarrollando una red alternativa no sujeta a bloqueos, filtraciones ni cierres.

MEDICINA

Bloquear el ataque del VIH

Carl June y Bruce Levine

Se está ensayando en humanos un tratamiento que evitaría que el virus entrase en ciertas células inmunitarias.



ASTROFÍSICA

El futuro lejano de las estrellas

Donald Goldsmith

El universo está todavía lleno de vida. Nuevos fenómenos cósmicos comenzarán a observarse durante los próximos billones de años.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Gary Stix, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Deborah Franklin, Maryn McKenna, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos: 6,00 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Manuel González Mañas: *Edición de genes: una nueva herramienta para la biología molecular*; Bruno Moreno: *Apuntes, Radiografías por contraste de fase* y *El silencio de los cóndores*; Tomás Ortín: *¿Es digital el espacio?*; José M.ª Vidal Donet: *El debate del cáncer de próstata*; Fabio Teixidó: *Desde África hasta el Amazonas*; Xavier Roqué: *Historia de la ciencia*; Mercè Piqueras: *Durmiendo con su enemigo* y *Los ácidos grasos y la salud*; J. Vilardell: *Atrapar el viento, Curiosidades de la física* y *Hace...*; Alfonso Susanna: *El futuro del chocolate*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España